

Masteroppgåve, Institutt for geofag

Analyse av sommarbalansen på Hellstugubreen, Jotunheimen, i 2014 og 2015

*Med fokus på ablasjonsmønster, representativt
stakenettet og feilkjelder i måle- og utrekningsprosess*

Oda Jonette Røyset



UNIVERSITETET I OSLO

DET MATEMATISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

Analyse av sommarbalansen på Hellstugubreen, Jotunheimen, i 2014 og 2015

*Med fokus på ablasjonsmønster, representativt stakenett og
feilkjelder i måle- og utrekningsprosess*

Oda Jonette Røyset



Masteroppgåve i geofag

Studieretning: Naturgeografi

Institutt for geofag

Matematisk-naturvitskapleg fakultet

UNIVERSITETET I OSLO

1. desember 2015

© Oda Jonette Røyset, 2015

Rettleiarar: Liss M. Andreassen og Jon Ove Hagen

Dette eksamensarbeidet er publisert elektronisk i DUO – Digitale Utgivingar ved UiO

<http://www.duo.uio.no>

Det er også katalogisert i BIBSYS (<http://www.bibsys.no/>)

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted, in any form or by any means, without permission.

Forord

Arbeidet med denne masteroppgåva starta med feltarbeid på Hellstugubreen i april 2014. Sidan då har eg fått oppleve mange flotte men sjølvstags også tøffe stunder. Difor er eg utruleg taknemleg for all hjelpa eg har fått både med feltarbeid og til sjølvstags oppgåva. Først og fremst vil eg takke Liss M. Andreassen og Jon Ove Hagen for god rettleiing, og ikkje minst for å ha lært meg kunsten med feltarbeid. Takk for at døra di alltid har vore open for meg Jon Ove, og for di positive holdning og innspel. Takk til Liss for alle dine gode idear, for alt du har lært meg, tolmod, flotte turar i felt og veldig nyttige tilbakemeldingar på utkastet til denne oppgåva.

Takk til Universitetet i Oslo og NVE for økonomisk støtte og utstyr til feltarbeidet. All boringa hadde blitt vanskeleg utan Kovacs-boret. Data blei også gjort tilgjengeleg av NVE, og ikkje minst lån av hytta på breen, noko eg er veldig takksam for. Vidare vil eg også takke Liss M. Andreassen for deltidjobb i NVE, der eg både har vore i felt og gjort kontorarbeid for bre, snø og skredavdelinga. Det har vore kjekt å bli kjent med gjengen på brekontoret.

Vidare vil eg takke alle som har vore med meg i felt på Hellstugubreen. Tusen takk til kjærasten min Jim for fleire turar i felt. Du bora fantastisk rette stakar med militær presisjon. Takk for at du ikkje ga opp og for all støtta gjennom heile masterarbeidet. Tusen takk til Krisin for at du var med, bar tungt, bora og for at du blei med på den spennande ferda i botnane fulle med nysnø. Så må eg takke min fantastisk spreke pappa som var med meg i felt. Takk for skikkeleg kvalitetstid og for at du ikkje ga deg når begge bora streika og vi brukte 4-5 timar på å bore tre meter.

Til slutt må eg sjølvstags takke alle studentane på rom 214. Utan dykk hadde det blitt kjedeleg. Vi har funne på utruleg mykje artig, spesielt med alle pranksa. Tusen takk til Robert for at du har vore til hjelp for alle på rommet, og for at du har hjelpt meg med alle dataproblema mine. Takk til Ingvild og Sunniva for korrekturlesing og takk til Alex og Mathieu for turar i felt og samtalar på kontoret. Takk også til Celine, Amund, Kenneth, Øystein, Ida. Dokke er flotte!

Oda Jonette

Blindern, desember 2015

Samandrag

Tradisjonelle massebalansemålingar med stakar og tettleiksprøver har vore utført i Noreg i over 50 år. Hellstugubreen, som denne oppgåva tek føre seg, har ein av dei lengste massebalanseseriane i Noreg. Massebalansen kan målast med ulike metodar. Dei siste tiåra har teknologiske utviklingar ført til at den geodetiske metode for massebalanse har blitt meir nøyaktig. Denne metoden nyttar høgdemodellar og målar ikkje årsbalansen, men massebalansen over fleire år, gjerne ei tiårsperiode. Uavhengige observasjonar gjort med tradisjonell- og geodetisk metode samsvarar stort sett, men gir for nokre brear i Noreg store avvik. Fleire faktorar kan vere årsak til denne skilnaden, ein av dei er stakenett som er for sparsame eller plassert slik at det ikkje målar den faktiske massebalansen på breen.

Denne oppgåva tek derfor føre seg eit utvida stakenett som blei satt ut på Hellstugubreen 1. april 2014. Dette for å revurdere det romlege ablasjonsmønsteret og representativiteten til stakenettet, for å finne ut kor godt stakane fangar den romlege variasjonen i overflatebalanse. I denne samanheng blei større områder, botnar, som sjeldan eller aldri har vore målt før inkludert i stakenettet. Representativiteten i tradisjonelle målingar er ei kjelde til usikkerheit, og derfor har også andre feilkjelder i måle- og utrekningsprosess blitt undersøkt her.

Målingane på det utvida stakenettet blei utført massebalanseåra 2014 og 2015, og resultatata viser først og fremst eit stakenett som er representativt for ablasjonen på breen.

Sommarbalansen funne ved det utvida og opphavlege stakenettet viser tilsvarende resultat. Ablasjonen på stakar ved same høgde er lik på bretunga men frå 1800 m.o.h. smeltar det noko mindre i dei vestlege områda nær botnane. Likevel fangar stakenettet stort sett middelablasjonen ved det gitte høgdeintervallet. Sommarbalansen i den nordlegaste botnen skilte seg ut samanlikna med dei andre botnane, men her viste usikkerheita i måleprosessen seg å vere stor. Ulike regresjonsmetodar og romlege interpoleringsmetodar av sommarbalansen blei prøvd ut og resultatet viste låg sensitivitet i høve val av metode. Vidare viste målenett heilt ned i fire stakar liten forskjell i sommarbalanse i høve balansen rekna ved hjelp av alle stakane. Usikkerheita blir derimot større ved bruk av færre stakar. Bruk av laterale målingar hadde generelt liten påverknad på sommarbalansen og ga lite ny informasjon om ablasjonen på breen. Resultatet viser at talet på stakar kan vere lågt, men ein må ta omsyn til at nokre stakar forsvinn, smeltar ut eller blir bøygd.

Innhald

1	Introduksjon	1
1.1	Motivasjon og bakgrunn	1
1.2	Problemstilling	2
1.3	Tidlegare arbeid	4
2	Vitskapleg bakgrunn	5
2.1	Terminologi	5
2.2	Massebalanse	5
2.3	Ablasjonsmekanismer og energibalanse	6
2.4	Fjernanalyse	8
3	Områdeskildring	9
3.1	Geografien i området	9
3.1.1	Hellstugubreen	9
3.2	Klimaet	12
4	Metode	14
4.1	Feltmålingar og observasjonar	14
4.1.1	Ablasjonsmåling	16
4.1.2	Snøprofil	17
4.1.3	Albedo	18
4.1.4	Andre målingar	19
4.2	Meteorologiske data	19
4.3	Massebalansedata	21
4.4	Programvarer og terrengmodellar	21
4.5	Handsaming av data	22
4.5.1	Terrenganalyse	22
4.5.2	Klassifisering av snølinje	23
4.5.3	Massebalanse og utrekningsmetode	24
4.5.4	Effekten av talet på stakar	26
5	Resultat	28
5.1	Temperatur og nedbør i området omkring breen	28
5.1.1	Temperatursamanlikning med to vêrstasjonar i nærleiken	28
5.1.2	Massebalanseåret 2013 - 2014	29

5.1.3	Massebalanseåret 2014 - 2015	31
5.2	Glasiologiske undersøkingar	35
5.2.1	Terrenganalyse	35
5.2.2	Snølinje.....	38
5.2.3	Albedo	45
5.2.4	Temporær ablasjon 2014.....	46
5.2.5	Temporær ablasjon 2015	51
5.2.6	Massebalanse.....	53
5.3	Stakenettet sin påverknad på sommarbalansen	58
5.3.1	Effekten av talet på stakar på Hellstugubreen	59
5.4	Usikkerheit og feilkjelder	62
5.4.1	Bruk av ulike metodar for utrekning av sommarbalansen	62
5.4.2	Effekten av skeive stakar.....	65
5.4.3	Bruk av ulike typar stakar	66
6	Diskusjon	68
6.1	Årleg massebalanse 2014 og 2015	68
6.2	Ablasjonsmønster	70
6.3	Målte og prøvde feilkjelder innan tradisjonell metode.....	75
6.3.1	Representativiteten til stakenettet.....	75
6.3.2	Metodar for utrekning	77
6.3.3	Effekten av skeive stakar og type stakar	79
6.4	Usikkerheit i feltmålingar og analysar.....	80
6.4.1	Tettleik	80
6.4.2	Albedo	81
6.4.3	Endring i breutstrekking og overflate.....	81
6.4.4	Globalstråling	82
6.4.5	Klassifisering av snølinje	82
7	Konklusjon	84
8	Vidare arbeid.....	86
	Referansar.....	87
	Vedlegg.....	94

Liste over figurar

Figur 1.1: Kart over stakeposisjon, tettleiksgrop og sonderingsprofil 1962	3
Figur 2.1: Skjematisk framstilling av komponentane i energibalansen	7
Figur 3.1: Lokalisering av Hellstugubreen i Jotunheimen	10
Figur 3.2: Kart over brefrontposisjonen i 1941, 1962, 1968	11
Figur 3.3: Årlege massebalansedata frå 1962-2013	12
Figur 3.4: Månadsnormaler for temperaturen på Juvasshøe.	13
Figur 4.1: Oversiktskart over Hellstugubreen med plassering av snøprofil	15
Figur 4.2: Tettleiksprøve målt med fjørvekt	18
Figur 4.3: Albedomåling	18
Figur 4.4: Ein PVC stake klar til å settast ut.	19
Figur 4.5: Lokalisering av Hellstugubreen og omkringliggjande vêrstasjonar.	21
Figur 4.6: Døme på histogram til evaluering av prøvepolygon	24
Figur 4.7 Tilhøvet mellom snødjup og kumulativ vassekvivalent	25
Figur 4.8: Høgdesoneinndeling på Hellstugubreen i 1963, 1966 og 2014.....	27
Figur 5.1: Temperatur (°C) frå AVS på Hellstugubreen, H13 og H44, og	28
Figur 5.2: Temperaturdata frå Juvasshøe vêrstasjon. Månadleg middeltemperatur 2014.....	29
Figur 5.3: Vinternedbøren 2013-2014 i Bøverdalen og Sogndal	30
Figur 5.4: Samanstilling av temperatur frå Juvasshøe, H13, H44 og nedbør	31
Figur 5.5: Temperaturdata frå Juvasshøe vêrstasjon. Månadleg middeltemperatur 2015.....	32
Figur 5.6: Kumulative positive graddagar ved H13 og H44 i 2014 og ved	33
Figur 5.7: Vinternedbør 2014-2015 ved vêrstasjonane Bøverdalen og Sogndal	34
Figur 5.8: Temperatur og nedbør sommaren 2015.....	34
Figur 5.9: a) Himmelretning og b) Helling på Hellstugubreen	35
Figur 5.10: Globalstråling (W/m^2).	37
Figur 5.11: Snølinje digitalisert under feltarbeid 22. juni og 17. juli.....	38
Figur 5.12: Landsat 8 bilete frå 13. juli, 22. juli og 15. september 2014..	40
Figur 5.13: Bilete frå H45 mot den sørlegaste botnen og snølinja.....	40
Figur 5.14: Bilete frå hytta og nordover mot botnen ved H74	41
Figur 5.15: Bilete frå H71 og vidare oppover breen	41
Figur 5.16: Bilete frå H45 mot den midterste botnen (H74)	41
Figur 5.17: Landsat 8 bilete frå 17. august 2015 og Landsat 8 bilete frå.....	43

Figur 5.18: Bilete frå fotopunktet, HFOTO	44
Figur 5.19: Albedomåling ved stake H77-2.	45
Figur 5.20: Punktdiagram av albdeo målt 16 – 17. september 2014.....	45
Figur 5.21: Temporær ablasjon ved samtlege stakar, ablasjon frå 19. juni.....	47
Figur 5.22: Middelablasjon for stakar ved same høgdenivå inkludert	48
Figur 5.23: Akkumulasjon ved stakar under 1800 m.o.h. i juni 2014.....	48
Figur 5.24: Temporær ablasjon, fram til visse tidspunkt	49
Figur 5.25: Akkumulasjon ved alle synlege stakar i mai 2014	50
Figur 5.26: Totalablasjon ved stakane i 2015.	51
Figur 5.27: Temporær ablasjon i perioden 11. juli til 29. september.	51
Figur 5.28: Akkumulasjon målt ved stakane 11. juli 2015	52
Figur 5.29: Ulik tettleiksverdi for firn og påverknad på sommarbalansen.	54
Figur 5.30: Massebalansediagram for spesifikk balanse og.....	56
Figur 5.31: Massebalansediagram for spesifikk balanse og.....	57
Figur 5.32: Sommarbalansen rekna ut ved bruk av det opphavlege stakenettet til NVE.....	58
Figur 5.33: Skilnad mellom sommarbalanse rekna ut ved hjelp av alle stakane og.....	60
Figur 5.34: Skilnad mellom målt og estimert sommarbalanse ved stakane i 2014.....	61
Figur 5.35: Skilnad mellom målt og estimert sommarbalanse ved stakane i 1963	61
Figur 5.36: Sommarbalansen rekna ut ved lineær regresjon , manuell metode og	63
Figur 5.37: Sommarbalansen interpolert og ekstrapolert over breoverflata ved hjelp av	64
Figur 5.38: Bilete stake H79. Tatt 20. august 2014.....	65
Figur 5.39: Smeltehol kring stake H84P i september 2015.....	66
Figur 5.40: Årsbalansen, ba, målt same stad ved hjelp av PVC	67

Vedlegg

Vedlegg 1: Oversiktskart over Hellstugubreen 2014 med plassering av....	94
Vedlegg 2: Oversiktskart over Hellstugubreen 2015 med plassering av ...	95

Liste over tabellar

Tabell 4.1: Ablasjonsstakar på Hellstugubreen i 2014-2015.	17
Tabell 4.2: Oversikt over vêrstasjonane med drift, høgde og avstand	20
Tabell 4.3: Oversikt over satellittbileter som blei nytta i 2014 og 2015.	23
Tabell 5.1 Månadleg middeltemperatur ved Juvasshøe i 2014 samanlikna med	30
Tabell 5.2: Månadleg middeltemperatur ved Juvasshøe i perioden 2000-2013, i 2015.....	32
Tabell 5.3: Albedomåling 16. – 17. september 2014.	45
Tabell 5.4: Eit utval av albedo målt ved forskjellige typar overflater 16. - 17. september.....	46
Tabell 5.5: Tettleiksmålingar i 2014.	53
Tabell 5.6: Tettleiksmålingar i 2015.	54
Tabell 5.7: Fordelinga av vinter, sommar og årleg balanse i 50 m høgdeintervall	55
Tabell 5.8: Fordelinga av vinter, sommar og årleg balanse i 50 m høgdeintervall	57
Tabell 5.9: Middelerdi for Bs rekna ut ved hjelp av ulike kombinasjonar av fire, åtte.....	60
Tabell 5.10: Sommarbalansen i 2014 rekna ut ved hjelp av det utvida stakenettet og	62
Tabell 5.11: Lineær regresjon og kvadratisk regresjon med likning og r^2	62
Tabell 5.12: Stakevinkel målt på stakane, utrekna lengde ved bruk av trigonometri og	65
Tabell 6.1: Positive graddagar (PDD) og positiv graddagsfaktor (DDF), rekna ut ved.....	69
Tabell 6.2: Positive graddagar (PDD) og positiv graddagsfaktor (DDF) i 2014	70
Tabell 6.3: Verdier for helling, himmelretning, globalstråling og albedo	72
Tabell 6.4: Verdier for helling, himmelretning, globalstråling og albedo for stakar over	73
Tabell 6.5: Stakemålingar ved H48 og H49 som ligg i same botn, samanlikna med	74

Liste over forkortingar

AVS.....	Automatisk vêrstasjon
ba.....	Årleg sommarbalanse ved eit punkt
Ba.....	Spesifikk årleg sommarbalanse for heile breen
bs.....	Sommarbalansen ved eit punkt
Bs.....	Spesifikk sommarbalanse for heile breen
B _{Salle}	Spesifikk sommarbalanse for heile breen rekna ut ved hjelp av alle stakane
bw.....	Vinterbalanse ved eit punkt
Bw.....	Spesifikk sommarbalanse for heile breen
DDF.....	Degree day factor/Graddagsfaktor
DEM.....	Digital terrengmodell
ELA.....	Likevektslinje
EBK.....	Empirisk Bayesian Kriging
GIS.....	Geografisk informasjonssystem
IPCC.....	Internasjonalt organisasjonspanel for klimaendring
m.o.h.....	Meter over havet
m v.e.....	Meter vassekvivalent
NVE.....	Norges vassdrags- og energidirektorat
PDD.....	Positive degree days/Positive graddagar
PVC.....	Polyvinylklorid (syntetisk plast)
RMSE.....	Root mean square error
S.O.....	Sommaroverflata
WGMS.....	The World Glacier Monitoring Service

1 Introduksjon

1.1 Motivasjon og bakgrunn

Noreg er eit land med stor utstrekking av isbrear og dei spelar ei viktig rolle for vasskraft, turisme og klimaforskning. Massebalansemålingar på ulike brear er viktig for å studere klimasignal, sjå endringar og studere havnivåauke. Breane er sensitive til klimaet og dette gjer at det er ein direkte samanheng mellom endring i massebalanse og klima (IPCC, 2013).

Vidare er breane viktige som vasslager og bidragsytar til vasskraftanlegga. Dette var nokre av grunnane til at Norges vassdrags og energidirektorat (NVE) starta systematiske målingar på ei handfull brear på 1960 talet. Det blei etablert eit brekontor med Gunnar Østrem i spissen, og sidan då har mange brear i Noreg blitt målt over kortare og lengre periodar.

Då NVE først starta med målingar var det ved hjelp av den glasiologiske metoden med *in situ* stakemålingar, sonderingar og tettleiksprofil. Denne metoden blir framleis brukt med få endringar (Andreassen et al., 2005). På Hellstugubreen blei det starta opp med målingar i 1962 noko som gir over 50 år med kontinuerlege observasjonsdata. Sjølv før dei kontinuerlege målingane byrja var Hellstugubreen ein av dei best undersøkte breane i Jotunheimen (Pytte, 1964). Det var fleire grunnar til at denne breen blei plukka ut. Den er verken for stor eller liten, geometrien er vell definert, den er nokså lett tilgjengeleg og har få bresprekker (Kaser et al., 2003). I tillegg gjer høgdespennet på om lag 750 m at det er mogleg å studere variasjonar i ELA. Dette er faktorar som gjer ein bre eigna til måling (Kaser et al., 2003). Då målingane byrja blei eit omfattande stakenettverk teke i bruk, med tre til seks stakar i transekt for nesten kvart høgdeintervall som blei målt (Pytte, 1964). Figur 1.1 viser korleis stakenettverket såg ut på denne tida. Stakenettverket blei gradvis redusert basert på erfaring, og enda med stort sett å følgje senterlinja. Sidan ablasjon er avhengig av temperatur og minkar med høgda over havet var dette også ei grunnngjeving for reduksjonen.

Omfattande analyser av usikkerheita til denne typen målingar har sjeldan blitt gjort og ofte blir det brukt grove mål på det (Fountain og Vecchia, 1999; Zemp et al., 2013). Feilkjeldene kan kome av sjølve feltmålingane, evna stakenettet har til å fange romleg variasjon i overflatebalanse, og endring i breen si utstrekking og overflate. Feil i sjølve feltmålingane kan kome av avlesingsfeil, feil i tettleiksmåling eller at stakane sig, flyt eller tiltar (Østrem og Haakensen, 1999; Dyurgerov, 2002; Thibert et al., 2008; Zemp et al., 2013).

Dei siste tiåra har det skjedd store teknologiske utviklingar som har gjort den geodetisk metoden med måling av massebalanse meir nøyaktig. Denne metoden nyttar høgdemålingar målt over intervall på fleire år, gjerne tiår. Gjennomsnittleg årleg massebalanse i perioden mellom målingane blir funne ved å multiplisere med tettleiken (Fischer, 2011) eller ein konverteringsfaktor (Huss, 2013). Høgdemålingane kan gjerast ved hjelp av laser og radaraltimetri frå fly og satellittar eller ved hjelp av *in situ* GPS-målingar. Vidare kan høg-oppløyslege terrengmodellar av brear konstruerast ved hjelp av bilete tatt med fly, dronar og satellitt, eller ved hjelp av andre metodar som radar interferometri og laserskanning Bamber og Rivera (2007) gir ein utførleg gjennomgang av dei geodetiske metodane.

Ei utfordring er at det for nokre brear i Noreg har vist seg å vere stor skilnad i resultat funne ved hjelp av tradisjonell og geodetisk metode (Haug et al., 2009; Andreassen et al., 2015). Ein grunn til dette kan vere at stakenettet på breane ikkje fangar godt nok den romlege variasjonen i overflatebalanse. Denne feilkjelda blir av fleire forfattarar sett på som hovudkjelda til usikkerheit når det kjem til tradisjonelle massebalansemålingar (Cogley et al., 1996; Cuffey og Paterson, 2010). Likevel har den geodetiske metoden også sine feilkjelder og metodane kan ikkje verifisere kvarandre sidan det nøyaktige resultatet ikkje er kjent (Zemp et al., 2013; Andreassen et al., 2015). Uansett kan bruk av begge metodar på same bre føre til forbetringar innan metodane og meir nøyaktige resultat.

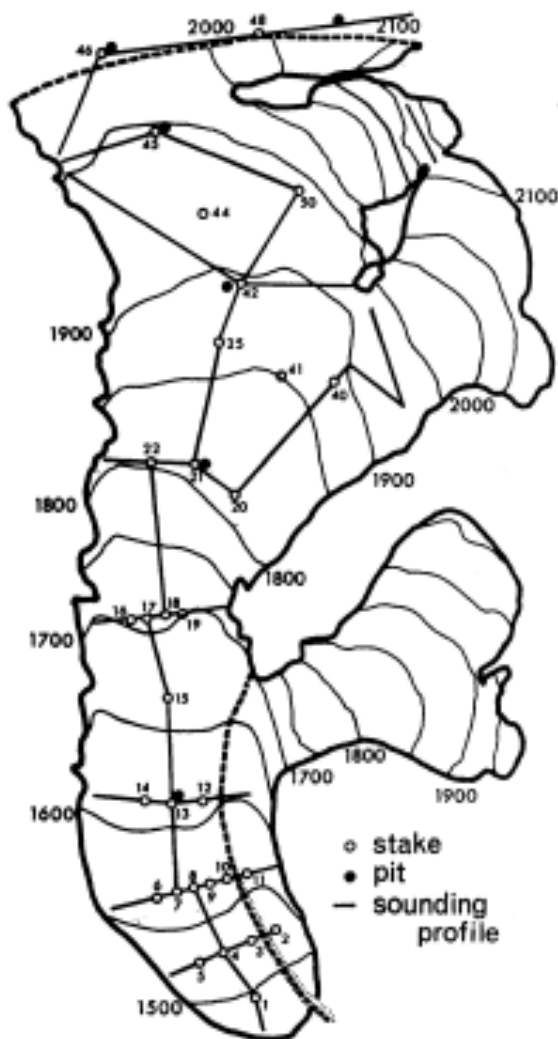
1.2 Problemstilling

Den store skilnaden i massebalanse funne ved bruk av tradisjonell og geodetisk metode, for nokre brear, dannar bakgrunn og motivasjonen for denne oppgåva. Observasjonsnettet på Hellstugubreen blei i denne samanhengen utvida for å revurdere det romlege ablasjonsmønsteret i tråd med anbefalingar i Zemp et al. (2013). Denne utvidinga av observasjonsnettet inkluderte også to botnar som sjeldan eller aldri har vore målt.

Problemstillingane for oppgåva er:

1. Kor godt fangar dagens stakenett på Hellstugubreen romleg variasjon i overflatebalanse? Vil eit utvida stakenett eller endra stakeposisjonar påverke målt sommarbalanse?
2. Korleis påverkar botnane massebalansen?
3. Kor store er feilkjeldene ved bruk av tradisjonell metode, og korleis varierer ablasjonsmønsteret på breen?

Position of stakes, pits and sounding profiles



Figur 1.1: Kart over stakeposisjon, tettleiksgrop og sonderingsprofil ved Hellstugubreen i 1962-1963 (Pytte, 1964).

1.3 Tidlegare arbeid

Dei første systematiske breobservasjonane i Noreg starta i slutten av 1800- byrjinga av 1900-talet med brefrontmålingar på ei rekkje brear, mellom anna Hellstugubreen i 1901 (Hoel og Werenskiold, 1962). Dette arbeidet blei gjort av enkeltpersonar og forskarar som fekk støtte frå ulike fond og grupper i Noreg. P.A. Øyen starta arbeidet i Jotunheimen og heldt på fram til han ikkje lenger fekk støtte i 1912. I 1933 tok Professor Werenskiold opp igjen arbeidet og haldt fram med dette til Norsk Polarinstitut tok over det glasiologiske arbeidet i Noreg i 1948 (Hoel og Werenskiold, 1962). Polarinstituttet dreiv både fotogrammetrisk kartlegging og undersøking av hydrologi, ablasjon og hastigheit på Hellstugubreen (Hoel og Werenskiold, 1962; Liestøl, 1962; Andreassen og Winsvold, 2012).

Då brekontoret blei etablert vart Hellstugubreen ein av dei utvalde breane for massebalansemåling. Hellstugubreen er difor ein av seks brear som har blitt målt sidan 1963 eller tidlegare (Andreassen et al., 2005). Storbreen har den lengste kontinuerlege måleserien i Noreg og er målt sidan 1949 (Andreassen, 1999). Dette er den nest lengste massebalanseserien i verden etter Storglaciären i Sverige (Linderholm et al., 2007). Både Hellstugubreen og Storbreen er referansebrear til World Glacier Monitoring Service (WGMS, 2013)

I 1962 skreiv Randi Pytte ei omfattande hovudfagsoppgåve som tok føre seg glasiologiske undersøkingar på Hellstugubreen. Både eit tekstbind og eit figurbind blei utvikla der undersøking av massebalansen i åra 1961/1962 og 1962/1963 blei utført. I tillegg blei det gjort undersøking av tettleiksauke i firn og snø, måling og kalkulering av brerørsle, volumendringar i perioden 1941-62 og spesielle undersøkingar av ablasjon under ulike mengder morenemateriale. I seinare tid har Hellstugubreen vorte studert i samband med fleire samanlikningar av geodetisk og tradisjonelle massebalansemålingar (Haakensen, 1986; Andreassen et al., 2002). Vidare er breen del av eit vest-aust profil av brear som blir målt og er gjenstand for forskning (Andreassen et al., 2005). Det har også blitt skriva fleire masteroppgåver som har tatt føre seg mellom anna snøfordeling (Walmsley, 2015) og temperatur og hastigheit på Hellstugubreen (Tachon, 2015).

2 Vitskapleg bakgrunn

2.1 Terminologi

Terminologien for massebalanse har lenge blitt kreditert Anonymous (1969). I 2011 blei *Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms* (Cogley et al., 2011), publisert som ein oppdatering og revidering av den gamle. Denne vil bli følgt så langt det let seg gjere i denne oppgåva. *bs* vil her vere sommarbalansen på eit punkt medan *Bs* er spesifikk sommarbalanse for heile breen. Det same gjeld for vinterbalansen (*bw* og *Bw*) og årleg balanse (*ba* og *Ba*). Årleg balanse blir brukt i staden for nettobalanse, for å tydeleggjere at det er snakk om eit balanseår (Cogley et al., 2011). Vidare er det gjort fornorskingar av nokre forkortingar som er mykje brukt i litteraturen. Dette gjeld til dømes meter vann ekvivalent (m v.e.). Alle forkortingar som er brukt er å finne i «liste over forkortingar».

2.2 Massebalanse

Det er akkumulasjon og ablasjon i løpet av eit år som gir massebalansen. Akkumulasjon skjer i hovudsak i form av snøfall, men andre prosessar som massetransport ved snøskred frå fjell rundt, og vindtransport kan vere viktig. Akkumulasjonen er avhengig av nedbør, vindretning og topografiske forhold i området. Difor kan det vere stor variasjon i snøakkumulasjon på små avstandar. Snøen har ein tendens til å blåse bort frå toppar i terrenget og samle seg opp i dumpar og lesider (Dewalle og Rango, 2008). Ablasjon skjer ved smelting, fordamping og sublimasjon men også kalving og vindskuring kan vere viktig (Cuffey og Paterson, 2010). Ablasjonen vil minke gradvis med høgda over havet sidan den er avhengig av temperaturen (Holmlund og Jansson, 2003).

Massebalansen kan finnast ved bruk av ulike tidssystem der målingane blir utført på fastsette datoar i forhold til det hydrologiske året eller varierende datoar etter forholda det gitte året. Vanlegast er bruken av det stratigrafiske systemet med måling mellom årlege minimum, og varierende lengde på massebalanseåret (Østrem og Brugman, 1991; Andreassen et al., 2005). Dette er det som blir nytta av NVE. For å få sesongbalansane blir også årleg maksimum målt. Sesongbalansane, *bw* og *bs*, blir gjort om til vassekvivalentar (m v.e.). Vassekvivalenten til eit snødekke blir av Dewalle og Rango (2008) definert som alt vatn som blir frigjort når heile

snødekke smeltar. Dette kan målast direkte eller som i dette tilfelle ved hjelp av målingar av snødjup og tettheit. Dewalle og Rango (2008) uttrykker vassekvivalenten som:

$$vassekvivalent = d \frac{\rho_s}{\rho_v} \quad (1)$$

Der d er snødjupet, ρ_s er tettheiten til snøen og ρ_v er tettheiten til vatn. Vidare for å finne volumbalansane vert ein middelferd av b_s og b_w rekna ut for kvart 50 m høgdeintervall, og multiplisert med arealet av det området det representerer. Regresjon av punktbalansen med høgda over havet er ein vanleg metode for å finne middelferdien i kvart høgdeintervall for sommarbalansen. For å kunne samanlikne ulike brear må ein ha den spesifikke balansen for heile breen, altså uavhengig av areal (Cogley et al., 2011). Denne finn ein ved å dividere volumbalansen på det totale arealet. Den årlege spesifikke balansen for heile breen, gitt at sommarbalansen er negativ, vert av Holmlund og Jansson (2003) definert som:

$$Ba = Bw + Bs \quad (2)$$

Den spesifikke massebalansen vil variere ulike stadar på breen med overskot av snø i akkumulasjonssona og underskot i ablasjonssona. Desse sonene varierer noko frå år til år. Dersom sommaren er spesielt varm kan ablasjonssona strekkje seg langt inn i område dekkja av firn (Cuffey og Paterson, 2010). Likevektslinja (ELA) er grensa mellom desse sonene, der akkumulasjonen er lik ablasjonen (Nesje, 2010). Denne grensa er ofte ikkje eit skarpt skilje på breen, men meir ei sone der det gradvis blir meir snø. Temporær snølinje er den staden der ein til ei kvar tid finn skiljet mellom snø og blåis eller firn. Firn blir definert som snø som har overlevd i alle fall ein ablasjonssesong, men endå ikkje blitt omdanna til is (Cogley et al., 2011). Den temporære snølinja vil gradvis trekke seg oppover i løpet av ablasjonssesongen, og ligg som regel nær ELA mot slutten av sommaren. *Accumulation area ratio* (AAR) er høvet mellom akkumulasjonsområdet på ein bre og det totale arealet til breen. Ein dalbre i dynamisk og klimatisk likevekt har ein AAR på $0,65 \pm 0,05$ (Nesje, 2010).

2.3 Ablasjonsmekanismer og energibalanse

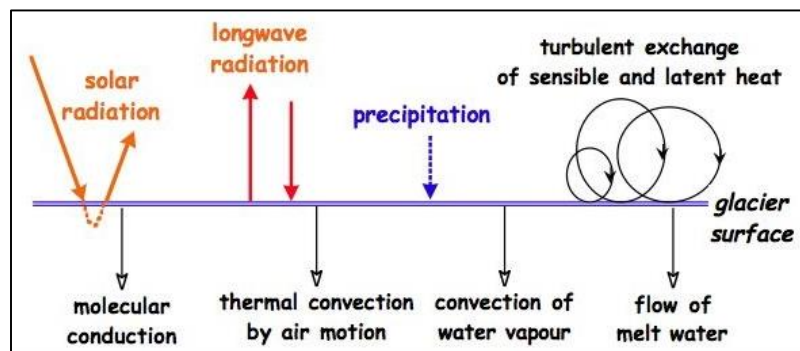
Energiutveksling mellom breoverflata og atmosfæren er avgjerande for ablasjonstilhøva. Det er skilnaden mellom energitilførsel og konsum som avgjer om ein bre mistar eller får tilført energi til smelting eller oppvarming. Både meteorologiske tilhøve og fysiske eigenskapar i

breoverflata er avgjerande (Hock, 2005). Det er fleire faktorar som spelar inn, og energibalansen i breoverflata kan skildrast med ei likning som inneheld både faktorar som gir og tek energi (Hock, 2005):

$$Q_M = Q_N + Q_H + Q_L + Q_R + Q_G \quad (3)$$

Q_M står for energi ledig til smelting, Q_N er netto radiasjon, Q_H sensibel varmekraft, Q_L latent varmekraft, Q_R sensibel varmekraft tilført av regn og Q_G varmekraft med bakken. Figur 2.1 gir ei skjematisk framstilling av komponentane. Q_N blir gitt av skilnaden mellom innkomande og utgåande stråling. Det vil seie kor mykje kortbølgs stråling som kjem inn og kor mykje av den som blir reflektert. I tillegg til høvet mellom innkomande og utgåande langbølgs stråling frå atmosfære og terreng. Den kortbølgs strålinga som treff toppen av atmosfæren blir spreidd og absorbert av gass, partiklar, vassdropar og iskrystallar på veg til jordoverflata (Hock, 2005). Difor treff berre delar av solenergien bakken. Det er transmissiviteten som avgjer kor mykje av solenergien som treff bakken (Andreassen et al., 2008b). Noko av strålinga treff overflata som direkte stråling og noko som diffusstråling. Diffusstråling er lys som blir spreidd i ulike retningar i atmosfæren, i tillegg til reflektert stråling frå terrenget rundt. Globalstråling er summen av desse tre komponentane, altså all kortbølgs stråling som treff overflata.

Q_H og Q_L blir kalla turbulente varmekraftar. Sensibel varmekraft oppstår når det er skilnader i temperaturen mellom snølaget og atmosfæren over. Då vil varme bli transportert ved konveksjon til det kaldare området. Mengda avhenger av kor stor skilnaden er, vindstyrke, overflatestruktur og stabiliteten i atmosfæren (Dewalle og Rango, 2008). Latentvarme blir overført når vatn endrar form, til dømes ved fordamping av vatn til vassdamp. Den blir driven av skilnaden i vassdamptrykk mellom snølaget og atmosfæren.



Figur 2.1: Skjematisk framstilling av komponentane i energibalansen (Oerlemans, 1995).

Stråling er den viktigaste energikjelda til smelting, dernest kjem dei sensible varmefluksane (Hock, 2005). Sidan netto solenergi er ein av dei viktigaste kjeldene til smelteenergi blir albedoen ein viktig faktor. Albedo (α) er forholdet mellom innkomande og utgåande kortbølgja stråling. Den viser kor mykje av strålinga som blir reflektert av overflata. Albedoen vil variere og endre seg i løpet av smeltesesongen. Nysnø har ein albedo på 0,8-0,9 medan is vanlegvis har verdiar mellom 0,3 og 0,5 (Cuffey og Paterson, 2010). Albedoen er også avhengig av andre faktorar som kornstørrelsen i snøen, stein og mikroorganismar i overflata, vassinnhald, kor mykje av strålinga som er direkte og diffus, vinkelen solstrålane treff overflata med og mikrotopografien i overflata (Cuffey og Paterson, 2010). Auka kornstørrelse, lausmasser og vassinnhald vil føre til lågare albedo, medan auka skydekke gir høgare albedo. I følge Hock (2005) aukar snøalbedoen med mellom 3-15% når klarvêr skyar over.

2.4 Fjernanalyse

Fjernmåling og observasjonar frå luft og verdsrom byrja som ein forskingsbasert aktivitet men er no i bruk over heile verda av privat industri, myndigheiter og forskarar (Lillesand et al., 2008). Teknologien er heile tida i utvikling og nye satellittar og system blir utvikla og forbetra. Eit døme på det er USGS-satellitten Landsat 8 som blei satt i drift i februar 2013. Satellitten dekkjer heile jorda i løpet av 16 dagar med ein skilnad på åtte dagar i høve Landsat 7 (USGS, 2015). To instrument er installert om bord «Operational Land Imager (OLI)» som mellom anna inneheld banda raud, grøn, blå (RGB) og «Thermal Infrared Sensor (TIRS)» med to termiske band. Til saman har Landsat 8 elleve band.

Datakvaliteten («signal to noise ratio») og radiometrisk oppløysing (12-bits) er høgare for Landsat 8 enn for tidlegare Landsat TM/ETM instrument (USGS, 2013). Landsatsensorane har vist seg å vere eit nyttig verktøy i kartlegging av brear og observasjon av endringar i breutstrekking (Kääb et al., 2002; Andreassen et al., 2008a). Det som avgrensar bruken er mengda skyfrie og egna scener over det aktuelle området og tidspunktet.

3 Områdeskildring

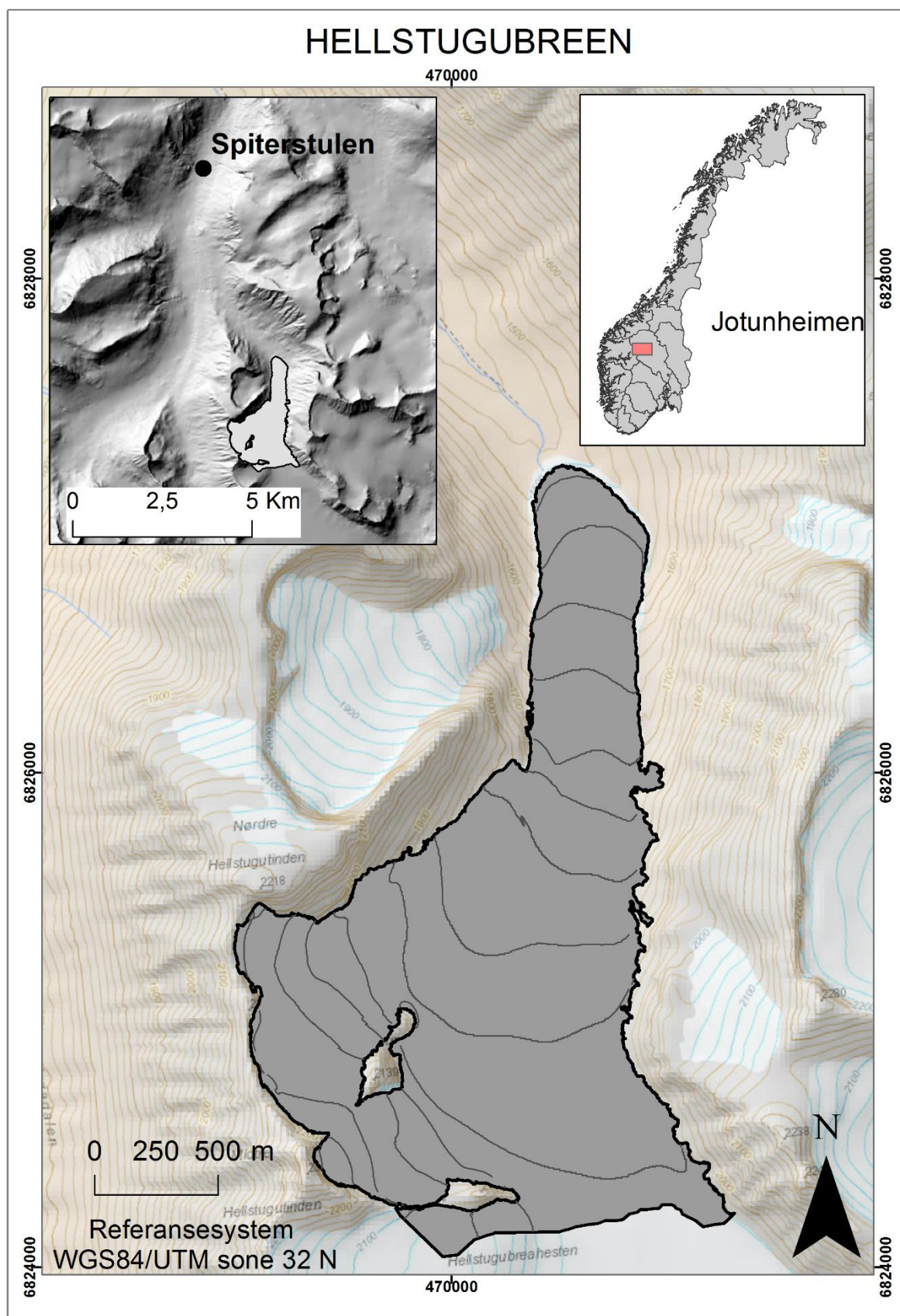
3.1 Geografien i området

Hellstugubreen er lokalisert i dei sentrale delane av Jotunheimen i Lom kommune. Nærare bestemt 61°34'N og 8°26'E. Breen er forholdsvis lett tilgjengeleg med bilveg til Spiterstulen og om lag 6 km gange inn Visdalen og vidare langs elva Hellstuguåe til brefronten (figur 3.1). I området er det mange høge og bratte fjell over 2000 meter over havet, og sjølve Hellstugubreen er omkransa av Hellstugutindane på vestsida og Memurutindane på austsida. Områder som grensar til Hellstugubreen er Urdadalen i vest, Memurudalen i søraust og Skautflya i nord.

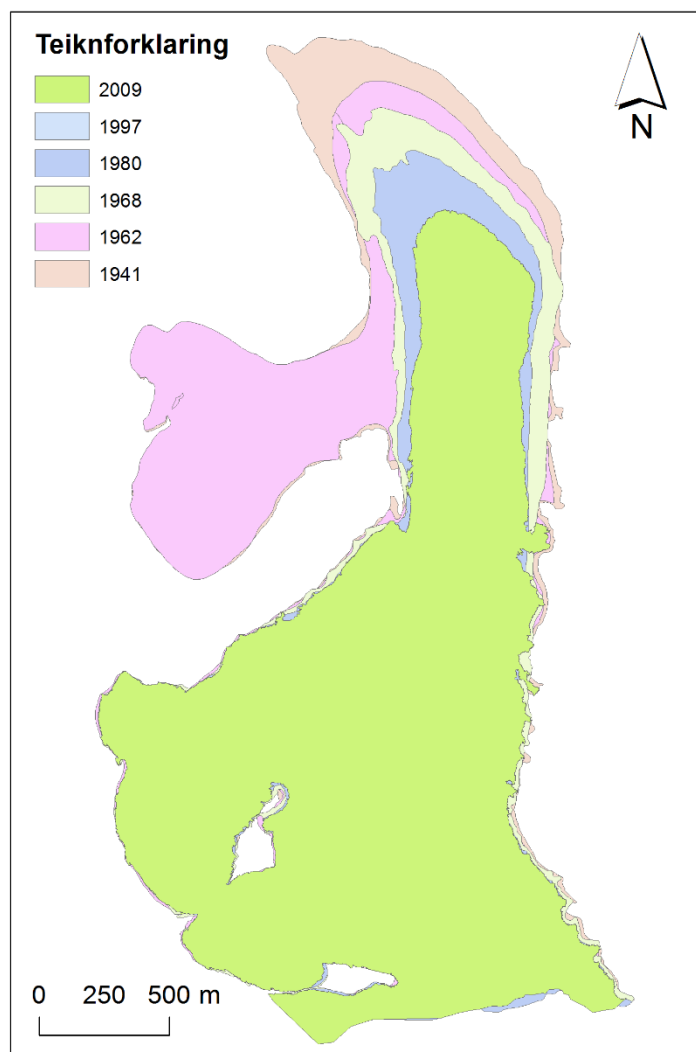
3.1.1 Hellstugubreen

Hellstugubreen er ein liten dalbre på 2,81 km² og strekkjer seg frå 1494-2212 m.o.h. Den gjennomsnittlege hellinga på breen er 13° (Andreassen og Winsvold, 2012). Hastigheita på breen varierer, men er på det meste opp i 15 meter i året om lag midt på breen (Tachon, 2015). På vestsida har breen tre botnar som utgjer dei høgastliggjande delane av breen. I sør grensar Hellstugubreen til Vestre Memurubre, skilje går ved brepasset om lag 1960 m.o.h. Her drenerer Hellstugubreen nordover og Memurubreen sørover mot Memurudalen.

I samband med massebalansemålingar har Hellstugubreen blitt kartlagt fleire gongar, siste gongen ved laserskanning i 2009. Brefronten har trekt seg tilbake om lag 800 meter frå 1941 til 2009 (figur 3.2), og 100 meter sidan forgje kartlegging i 1997 (Andreassen, 2010). Slike lengdeobservasjonar har forgått på Hellstugubreen sidan 1901, og frå då av fram til 2015 har Hellstugubreen trekt seg tilbake 1138m (NVE, 2015).



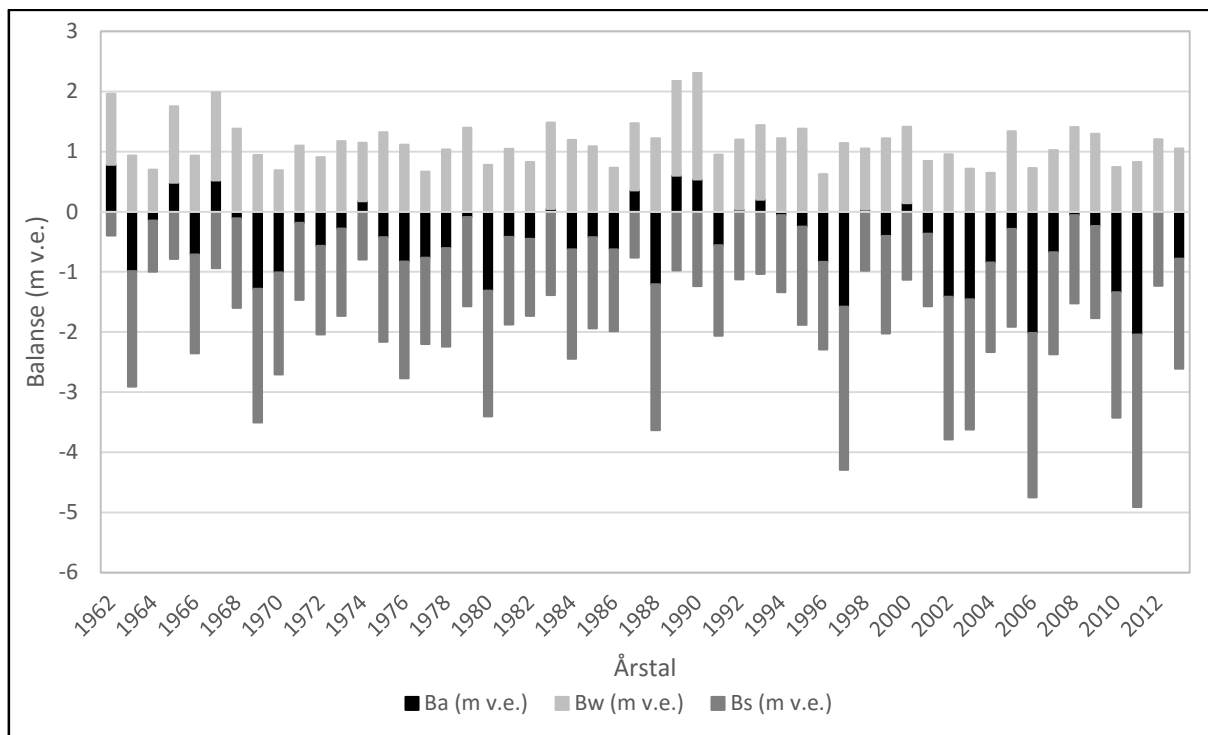
Figur 3.1: Lokalisering av Hellstugubreen i Jotunheimen med omkringliggende terreng.



Figur 3.2: Kart over brefrontposisjonen i 1941, 1962, 1968, 1980, 1997 og 2009 (data: NVE, 2015).

Massebalanse på Hellstugubreen

Den årlege massebalansetrenden på Hellstugubreen er negativ, men med ei lita periode på 90-talet med positiv årleg balanse (figur 3.3). Det kumulative massetapet for breen i perioden 1962 - 2013 er -21,8 m v.e. Dette gir ein årleg middelerdi på -0,43 m v.e. per år (NVE, 2015). Sommarbalansen varierer med nokre år med lite smelting innimellom mange år med stor smelting. I høve vinterbalansen (figur 3.3) ser det ikkje ut til å vere nokon trend. Walmsley (2015) tok føre seg snøfordelingsmønsteret på breen og fann denne tidsstabil. Likevel hadde nokre få år uregelmessig romleg snøfordeling. Dette skapte signifikante skilnadar i snøfordelingsmønsteret og feil i rekonstruerte Bw-verdiar.



Figur 3.3: Årlege massebalansedata frå 1962-2013, Ba står for årleg balanse, Bw vinterbalanse og Bs sommarbalanse (NVE, 2015).

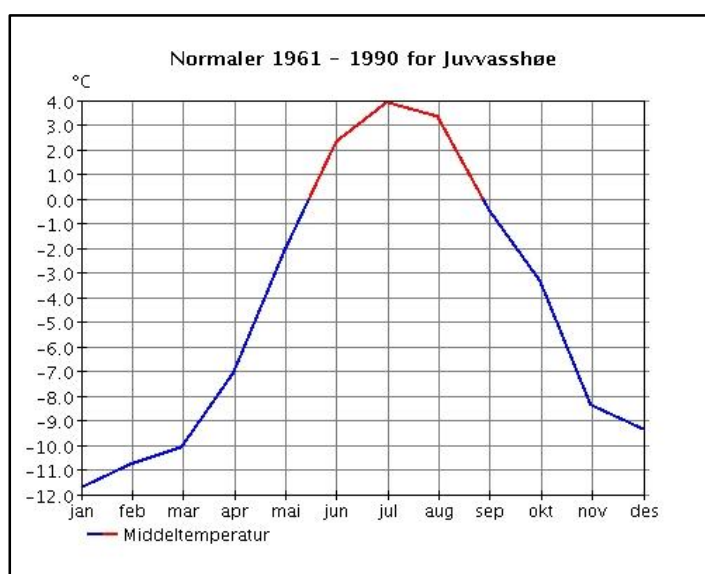
3.2 Klimaet

Jotunheimen ligg i dei sentrale delane av Sør-Noreg om lag 150 km frå kysten. Vasskiljet mellom aust og vestlandet går i Midt-Jotunheimen, og Hellstugubreen er lokalisert eit stykke aust for dette skiljet (Nesje et al., 2004). Den dominerande vindretninga i Sør-Noreg er frå sørvest og vest (Isaksen et al., 2002). Lågtrykk blir danna når varm og fuktig subtropisk luft møter kald polar luft frå nord. Når slike luftmasser treff kysten av Noreg blir den pressa oppover for å passere fjellkjeder som Jotunheimen. Dette gir orografisk nedbør etter kvart som temperaturen fell og lufta ikkje lenger klarer å halde på all fuktigheita (Langen, 2011). Det oppstår ein nedbørsgradient som fell innover i landet.

Dette er også synleg i massebalanseobservasjonar i Jotunheimen, der breane som er nærast vest-kysten har meir nedbør og ein høgare masseomsetnad enn breane lenger aust (Andreassen et al., 2005). Hellstugubreen blir rekna som ein kontinental bre og for normalperioden 1971-2000 var årsnedbørnormalen mellom 1000-1500 mm (seNorge, 2015). På grunn av sin kontinentalitet er det variasjonen i sommarbalansen som er den dominerande faktoren for massebalansen på Hellstugubreen (Andreassen et al., 2005).

Den næraste vêrstasjonen til Hellstugubreen er Juvasshøe som ligg 13 km nordvest på 1894 m.o.h. Denne stasjonen har vore drifta sidan september 1999. For normalperioden 1961-1990 har stasjonen ein estimert årleg middeltemperatur på $-4,5^{\circ}\text{C}$. Dei månadlege gjennomsnittstemperaturane er vist i figur 3.4. Sidan stasjonen ikkje har vore drifta heile perioden er dette ein normal som er estimert på bakgrunn av stasjonar i nærleiken som har vore drifta heile perioden (Isaksen, pers.komm.). Tida Juvasshøe har vore i drift har også blitt samanlikna med desse stasjonane, for å gjere estimeringa betre. For måleperioden 2000-2013 er årleg middeltemperatur for Juvasshøe $-3,5^{\circ}\text{C}$. Dei siste ti åra har middeltemperaturen i sommarmånadane (mai – jun. – jul. – aug. – sept.) variert frå $0,6$ på det lågaste til $3,9^{\circ}\text{C}$ på det høgaste (eKlima, 2015). Meteorologiske data og vêrstasjonar vil bli handsama vidare i kapittel 4.2.

Nedbøren blir ikkje målt ved Juvasshøe og den næraste stasjonen som måler nedbør ligg i Bøverdalen to mil lenger nordvest (figur 4.5). Den årlege nedbørsnormalen ved denne stasjonen frå 1961-1990 er på 430 mm. Denne stasjonen ligg i eit svært tørt område, nær Skjåk som har den lågaste nedbørsnormalen i Noreg. Nedbørsgradienten aust og vest for vasskiljet er bratt og skilnadane til stasjonar lenger vest er stor. Gjennomsnittleg årsnedbør ved Briksdal i normalperioden 1961-1990 er til dømes 1372 mm (eKlima, 2015). Andreassen og Oerlemans (2009) finn ein korrelasjon på 0,70 mellom akkumulert vinternedbør målt i Bøverdalen og bw på Storbreen. Dette er ein grei korrelasjon, men dei vestlege stasjonane korrelerte generelt betre med bw på Storbreen, som ligg 15 km vest for Hellstugubreen. Derfor vil nedbørsdata frå Sogndal bli nytta i tillegg til Bøverdalen i dei vidare analysane.



Figur 3.4: Månadsnormaler for temperaturen på Juvasshøe i perioden 1961-1990 (eKlima, 2015).

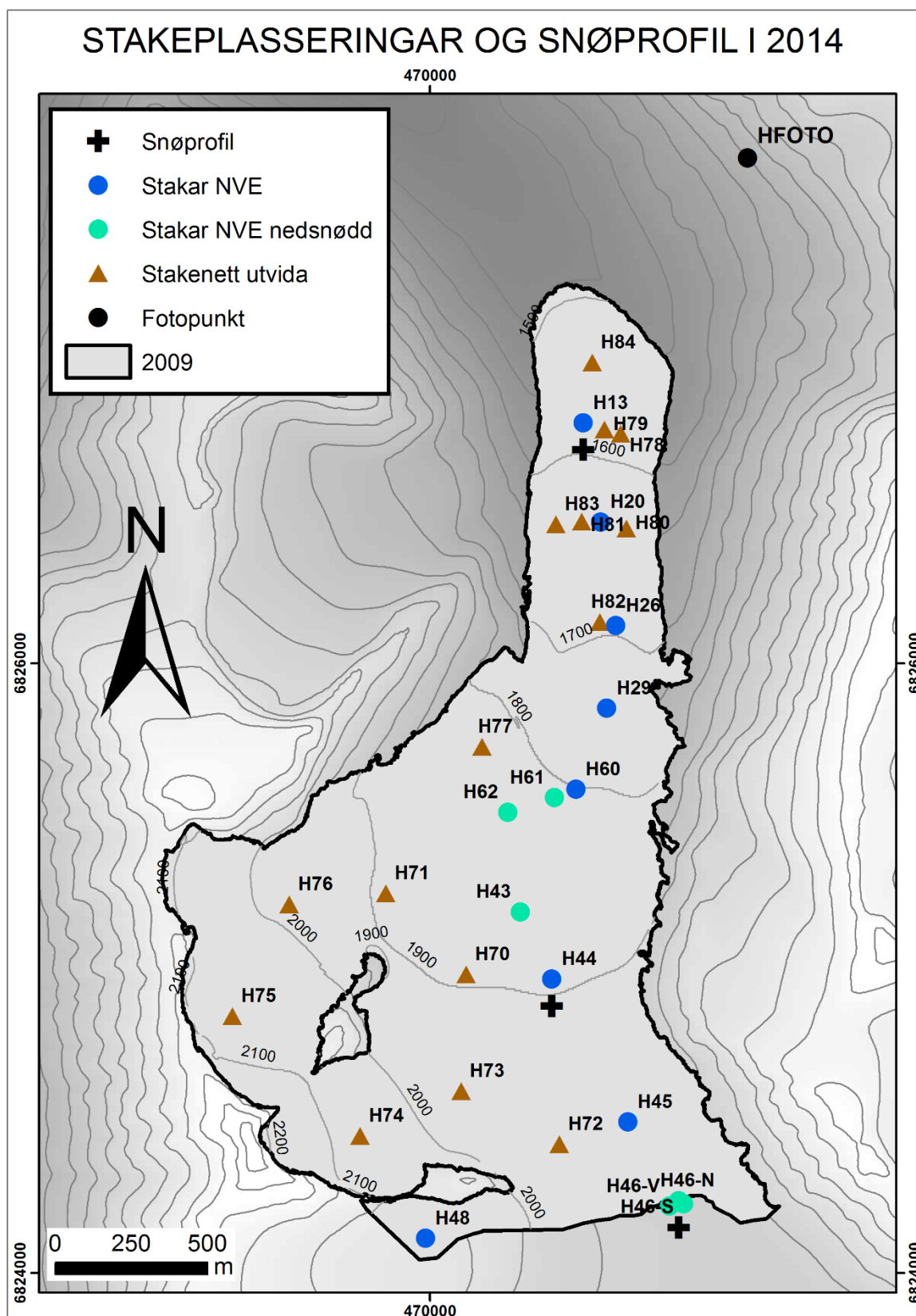
4 Metode

4.1 Feltnmålingar og observasjonar

Massebalansemålingar på Hellstugubreen blei utført både i 2014 og 2015. For å følgje utviklinga i ablasjon på Hellstugubreen og få med temporale smeltevariasjonar blei breen vitja fleire gongar i løpet av ablasjonssesongane. I 2014 blei målingane utført 1.–2. april, 17.–22. juni, 14.–19. juli, 19.–22. august og 16.–17. september. Stort sett blei hytta på bandet eller telt ved brefronten nytta under opphalda.

1. – 2. april blei akkumulasjonsmåling gjennomført av NVE med hjelp av tre masterstudentar, inkludert undertekna, som jobba med ulike glasiologiske undersøkingar av breen i masterarbeidet. I samarbeid med Institutt for Geofag blei det også gjennomført radarmålingar, utsetting av termistorar og automatisk vêrstasjon (AVS) for lufttemperatur ved stake H13 og H44 (Tachon, 2015). Snødjupna blei målt ved å sonde kvar 100 m langs valte profil ned til førre års sommaroverflate. Det var stort sett uproblematisk å finne sommaroverflata frå førre år, sidan berre botnane hadde snø/firn på overflata i slutten av smeltesesongen i 2013. Stakane blei lest av i tillegg til at det blei sondert i fire punkt rundt stakane. Tettleiken blei målt i sjakter grove ved stake H13, H44 og H46 (figur 4.1). Sidan akkumulasjonsmålinga blei gjort noko tidleg i 2014 blei det målt tilleggsakkumulasjon 14. mai. Målingane frå mai blei ikkje brukt til å rekne ut vinterbalansen, berre målingane 1.–2. april, dette for å ha konsistente målingar (Andreassen, pers.komm.). Under dei andre feltopphalda i 2014 blei det gjort stakevedlikehald (omboring av stakar det var smelta mykje på), ablasjonsmåling ved stakane, tettleiksmålingar og ei rekke tilleggsmålingar (kap. 4.1.4.).

I 2015 blei målingane utført 29. april, 10.–14. juli og 23.–24. sept. Akkumulasjonsmålinga blei utført ved sondering på same måte som i 2014. Tettleik blei målt ved stake H46 og H60. I løpet av ablasjonssesongen 2014 smelta snøen bort heilt opp til bandet. Difor blei sondering til firn berre gjort i botnane og områda i nærleiken av dei. Det same gjaldt for sonderingane i 2014 som for det meste var til is. I juli og september 2015 blei det gjort stakevedlikehald, ablasjonsmåling og tilleggsmålingar som i 2014. Oversikt over tettleiksprofil og kva stakar som var synleg i 2015 er vist i vedlegg 2. Der er også oversiktskartet i 2014, figur 4.1, teke med (vedlegg 1).



Figur 4.1: Oversiktskart over Hellstugubreen med plassering av snøprofil, fotopunkt, NVE-stakenett, utvida stakenett og nedsnødd stakar i 2014 (for oversikt over stakar i 2015, sjå Vedlegg 2).

4.1.1 Ablasjonsmåling

Før dette masterprosjektet tok til blei ablasjonen på Hellstugubreen målt ved hjelp av 12 stakar stort sett fordelt langs senterlinja. Nedre del av breen frå 1580 m.o.h. til 1820 m.o.h. har sju stakar; H13, H20, H26, H29, H60, H61 og H62. Der H13 er den lågaste. Øvre del frå 1820 til 2080 m.o.h. har fem stakar; H43, H44, H45, H46 og H48. Sistnemnde er den som står høgast. Nokon av desse posisjonane har fleire stakar i nærleiken med same namn. Dette gjeld H45 som i tillegg har H45tynn og H46 der fire stakar blei funne i slutten av sesongen. For å studere representativiteten til dette stakenettet, og sjå på lokal og romleg variasjon i smeltemønster blei talet på stakar utvida i transekt med dei gamle. Åtte stakar blei satt ut under feltarbeidet 1.–2. april 2014 i dei øvre delane av breen, og sju stakar blei sett ut 17.–22. juni 2014 i ablasjonsområdet. Dette ga totalt 27 stakar fordelt utover heile breen. Nærare informasjon om kvar stake er lista i tabell 4.1

Som ablasjonsstakar blei det nytta aluminiumsrøyr kutta i to og seks m lengder. To m stakane blei skøyta med korte og tynnare aluminiumstappar og tjæreband som held seg elastisk i kulde. Stakane blei bora ned i snø og firn ved hjelp av ein manuell kjernebor, seinare på sesongen blei eit Kovacs-bor med sveiv nytta for stakar som stod eller blei plassert på is. Bruk av drill i staden for sveiv blei også testa. I april blei det sett ut stakar i transekt med H44, H45 og H60, i tillegg til tre stakar i botnane som sjeldan eller aldri har vore målt før. Desse blei etter råkes namngitt H70-H77. I botnane blei stakane satt på firn, og for å unngå sig blei det nytta trepropp i enden av desse. I juni blei stakane H78-H84 plassert i breidda ut frå samtlege stakar i nedre del av breen unntatt stake H29.

Posisjonane blei valt på stadar med liten overflategradient og i områder utan sprekker. Prinsippet med stakemålingane er at stakane blir satt ut ved maksimal akkumulasjon og frys fast i isen. Vidare vil måling av stakelengde gjennom sesongen til smeltinga tek slutt gi total ablasjon. Stakelengda blei målt til næraste 0,1 cm. Etter kvart som det utvikla seg smelteholer og ujamne isoverflater under stakane blei målinga gjort med «straight-edge method» (Müller og Keeler, 1969). Det vil seie at det blei målt til ein målepinne som låg vinkelrett på rørsleretninga og deretter parallelt på rørsleretninga.

Tabell 4.1: Ablasjonsstakar på Hellstugubreen i 2014-2015. Alle koordinatar i WGS 84/UTM, sone 32N.

Stake	m.o.h.	Aust	Nord
84	1547	470533	6826985
13	1579	470504	6826787
79	1584	470574	6826774
78	1582	470574	6826774
83	1643	470414	6826455
81	1645	470499	6826463
20	1641	470561	6826462
80	1638	470646	6826441
82	1694	470558	6826134
26	1697	470611	6826122
29	1750	470581	6825851
60	1802	470480	6825585
61	1802	470409	6825558
62	1823	470256	6825510
77	1810	470172	6825725
43	1875	470298	6825183
44	1898	470401	6824963
70	1900	470120	6824978
71	1899	469856	6825244
45	1946	470650	6824494
72	1952	470425	6824421
73	1941	470103	6824595
46nord	1957	470817	6824236
48	2073	469986	6824112
74	2060	470103	6824595
75	2084	469353	6824841
76	1992	469539	6825207

4.1.2 Snøprofil

Det blei grove snøprofil tre stadar fordelt langs høgdeprofilen til breen, ved stake H13, H44 og H46. Tettleiken, ρ (kg/m³) av snøen ned til blåisen blei målt med ein stålsylinder med lengde 49,2 cm og diameter 7,2 cm. Dette gir eit volum, v_s , på om lag 2,0 liter. Sylinderen blei banka ned i snøen med ei plastklubbe til røyret stod i kant med snøen. Ei fjørvekt og ein plastpose blei brukt til å måle massen, m_s (kg), av prøva. Tettleiken blei deretter funne ved den generelle likninga:

$$\rho = \frac{m_s}{v_s} \quad (4)$$

Der ρ er tettleiken, m_s er massen til snøen og v_s er volumet av snøen.

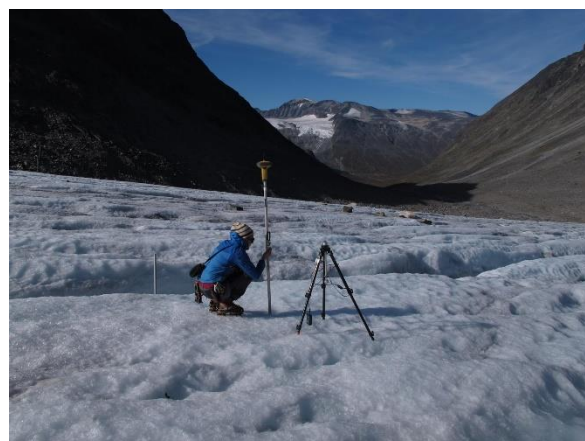
For å gjere usikkerheita rundt målingane mindre blei ei rekkje tiltak gjort. Det blei sondert der snøprofilen skulle gravast for å sjekke at snødjupna var representativ, og at det ikkje blei grove ved ei sprekk. Fjørvekta som blei brukt var ny og blei kalibrert før den blei teke i bruk (oppløysing 20g). Vidare blei det stort sett teke to parallelle prøver, og det blei sjekka at avviket mellom prøvene ikkje var for stort. For å sikre at tettleiksmålingane ikkje påverka stakemålingane blei snøprofilen grov nokre meter frå stakane. I 2014 blei tettleiken målt under kvart feltopphald ved dei tre utvalde posisjonane (figur 4.1). I 2015 blei tettleiken målt ved stake H46 i april og H60 og H46 i juli.



Figur 4.2: Tettleiksprøve målt med fjørvekt (Bilete: Jim R. Torbjørnsen).

4.1.3 Albedo

Albedo ved stakane blei målt med eit albedometer under feltarbeidet i 16.–17. september 2014. Mangel på sollys gjorde at ikkje alle stakane blei målt. Albedometeret blei utlånt av Institutt for marin og atmosfære forskning (IMAU) ved Universitetet i Utrecht i Nederland. Instrumentet hadde Kipp and Zonen-sensoren som var plassert på eit fotostativ med tre justerbare bein. Desse blei tilpassa under kvar måling slik at sensoren



Figur 4.3: Albedomåling (Bilete: Liss M. Andreassen).

stod parallelt med overflata. 99% av den reflekterte strålinga som treff albedometeret kjem frå eit område med ein radius på ti gongar høgda til instrumentet (Kipp og Zonen, 2013). Denne høgda varierte litt etter korleis beina blei justert men låg rundt 0.5 m, noko som gir ein måleradius på om lag 5 m. Det blei tatt mellom ein og fire målingar ved kvar stake og skugge, vêrforhold og overflatetype blei notert. Albedometeret målar innkomande kortbølgja stråling frå sola (S_{inn}) og reflektert kortbølgja stråling frå overflata (S_{ut}) i watt (W). Forholdet mellom desse S_{ut}/S_{inn} gir albedoen.

4.1.4 Andre målingar

I tillegg til dei vanlege ablasjonsmålingane blei det gjort fleire målingar og observasjonar på breen under opphalda. Snølinja blei følgt og registrert med ein handheldt GPS Garmin 62s og eit fotopunkt blei etablert opp mot Veoskardet for å dokumentere endringar i breoverflata i løpet av smeltesesongen (oversiktskart figur 4.1).



Figur 4.4: Ein PVC-stake klar til å settast ut. Stålvaier blei brukt i enden (bilete: Liss M. Andreassen).

Vinkelen stakane stod plassert på i høve isen eller snøen blei målt under kvar avlesing. Dette blei gjort med eit inklinometer montert inne i Silva Expedition spegelkompass. 0° blei definert som ein rett stake og skeive stakar fekk verdiar etter grader avvik frå 0. Ved hjelp av stakevinkelen og enkel trigonometri har effekten av skeive stakar blitt studert i høve ablasjon. I tillegg blei det under minimumsmåling i september 2014 sett ut fleire stakar i eit «staketest prosjekt». Stakar av syntetisk plast, PVC, blei sett ut i transekt med ein vanleg aluminiumsstake og ein aluminiumsstake med trepropp i enden. Dette blei gjort ved stake H60, H79 og H84. I juli blei det i tillegg satt ut ein PVC-stake ved stake H29.

Figur 4.4 viser bilete av ein PVC-stake brukt på breen. Ein stålvaier blei tredd gjennom nokre hol i enden av staken. Dette for at ståltråden skulle fryse fast i isen og få staken til å stå støtt. Stakane blei skøyta ved hjelp av ein tynn stålkjetting og skruar. Skruane blei satt inn i hol bora i enden av stakane, og kjettingen blei tredd på desse og festa slik at den haldt stakane saman. Dette gjer at PVC-ledda dett av kvarandre etter kvart som dei smeltar ut.

4.2 Meteorologiske data

AVS-ane som blei satt ut under feltarbeidet i april 2014 registrerer lufttemperatur med ein HOBO Pro V2 2x External Temperature data loggar (Tachon, 2015). Sensorane blei plassert i strålingvern på stakane. Då dei blei satt ut stod strålingsvernet 87 cm over overflata på H13 og

53 cm over overflata ved H44. Høgda til sensorane blei større i løpet av smeltesesongen og var oppe i rundt 4 m på det meste. Dette er det ikkje teke omsyn til i høve korreksjon.

Temperaturdata blei registrert kvar halvtime med ein nøyaktigheit på $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ (Tachon, 2015). Desse data blei seinare gjort om til døgngjennomsnitt. Registreringa blei utført 2. april til 19. september 2014. Data frå HOB0-loggaren må hentast manuelt og er difor ikkje tilgjengeleg for 2015.

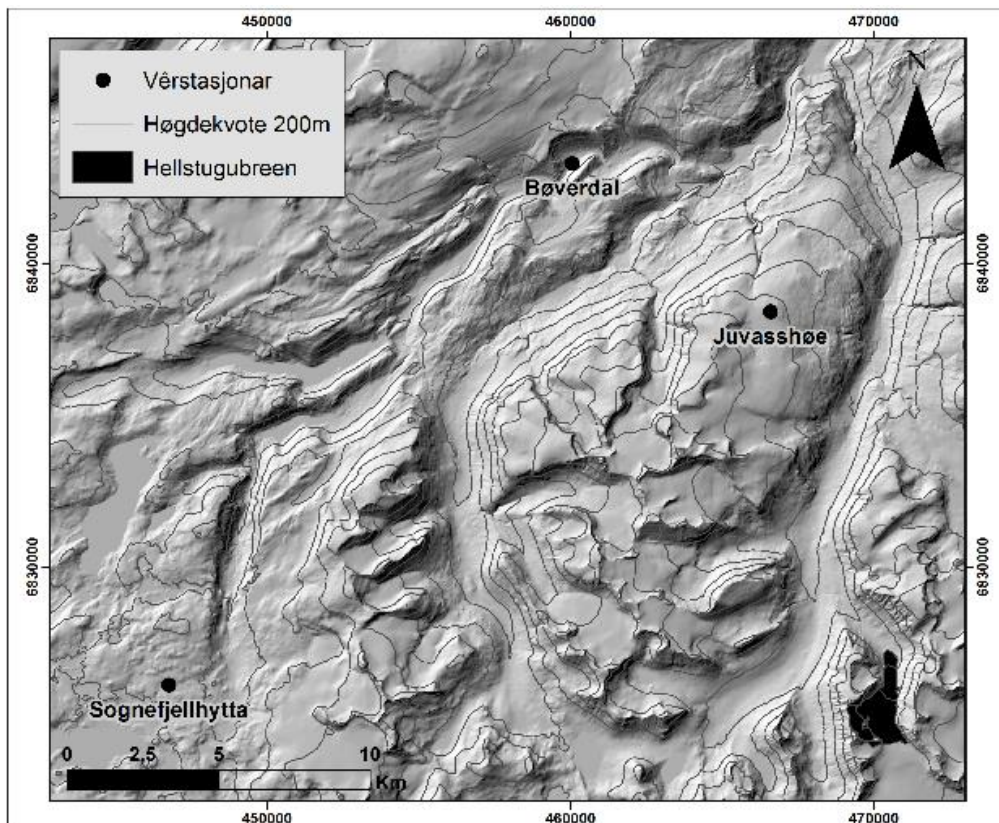
Temperaturdata frå dei to AVS-ane på Hellstugubreen blei samanlikna med temperaturdata frå vêrstasjonar i nærleiken (tabell 4.2). Dette for å sjå om stasjonane kan samanliknast og om data frå desse vêrstasjonane kan brukast for å studere hendingar bakover i tid. Vêrstasjonane som blei valt ut er Juvasshøe 13 km nordvest for Hellstugubreen og Sognefjellshytta 20 km vest for breen (figur 4.5). I tillegg blei stasjonane Bøverdal og Sogndal, som tidlegare nemnt valt for nedbørsdata. Meteorologisk institutt driftar og har tilsyn med stasjonane. Dei driv også ein internetbase, eKlima, der daglege middeltemperaturar blei lasta ned (eKlima, 2015).

Stasjonen ved Sognefjellshytta ligg rett ved Sognefjellsvegen på det høgaste punktet langs vegen, 1413 m.o.h. Juvasshøestasjonen står meir utsatt til på ein fjelltopp, 1894 m.o.h. Ser ein på perioden 2000-2013 viser data frå eKlima ein årsnormal på $-3,5^{\circ}\text{C}$ på Juvasshøe og $-1,9^{\circ}\text{C}$ på Sognefjellshytta. Det vanlege er å nytte normalperioder, som 1961-1990 eller 1971-2000, men sidan ingen av vêrstasjonane har vore operative så lenge blei perioden 2000-2013 valt.

Når temperaturar ved andre høgder på breen enn H13 og H44 har vore nødvendig å rekne ut, har ein temperaturgradient på $0,0075^{\circ}\text{C m}^{-1}$ blitt nytta. Dette er ein temperaturgradient brukt av De woul og Hock (2005) for Hellstugubreen, rekna ut ved bruk av Fokstua vêrstasjon.

Tabell 4.2: Oversikt over vêrstasjonane med drift, høgde og avstand frå Hellstugubreen

Stasjon	Stasjonsnr	I drift frå	Avstand (km)	Høgde (m.o.h.)
Juvasshøe	15270	1999	13	1894
Sognefjellshytta	55290	1978	20	1413
Bøverdal	15430	1902	20	701
Sogndal	55730	1895	84	421
H-13	-	2014	0	1580
H-44	-	2014	0	1900



Figur 4.5: Lokalisering av Hellstugubreen og omkringliggjande vêrstasjonar. Sogndal ligg 84 km vest for Hellstugubreen.

4.3 Massebalansedata

Gamle bredata frå NVE-arkivet har blitt sett gjennom og digitalisert av forfatternen, slik at data frå 1960-talet også har blitt tilgjengeleg. Stort sett vil massebalansedata frå 2014 og 2015 bli nytta i denne oppgåva. Likevel vil data frå 1963 og 1966 bli brukt for å sjå på effekten av antal stakar på Hellstugubreen. Dette fordi eit utvida stakenett ikkje var tilgjengeleg i 2015, på grunn av store snømengder. Vidare blei det også sjekka om botnane har vore målt med stakar tidlegare. Det hadde den midterste botnen og dei data som blei funne der vil også bli nytta.

4.4 Programvarer og terrengmodellar

Fleire programvarer og verktøy har vore i bruk for å analysere dei innsamla data. ArcMap 10.2.1 av ESRI® og verktøykassa romlege analysar (Spatial analyst) har vore nytta i terrenganalyse av breen og området rundt. I tillegg har programvara vore brukt til klassifisering og produksjon av ulike oversiktskart. Programvara MATLAB 2014b®,

Microsoft Excel 2013[®] og Minitab 17.1.0[®] har vore nytta til å kalkulere massebalansen og framstille resultat.

I analysar utført i ArcMap[®] har Kartverket sine terrengmodellar i 10 m og 20 m oppløysing vore i bruk. Dette er landsdekkjande modellar som blir oppdatert kontinuerleg etter dei best tilgjengelege kjeldene. I 2013 blei ein del nye filer i 10 m oppløysing tilgjengeleg (Kartverket, 2014). I tillegg har ein ny terrengmodell (DEM) av Hellstugubreen produsert i 2009 blitt nytta. Den er konstruert frå laserskanning 17. oktober 2009 og flyfoto 14. september 2009 av Hellstugubreen. Produksjonen blei gjort av Blom Geomatics AS og tilgjengeleggjort gjennom NVE.

4.5 Handsaming av data

4.5.1 Terrenganalyse

DEM frå Hellstugubreen i 2009 blei nytta til å utleie kart over helling og himmelretning på breen. Vidare blei ein terrengmodell frå Statens kartverk med 10 m oppløysing brukt til å rekne ut globalstråling på Hellstugubreen. Hellinga viser gradienten i terrenget målt i grader der 0° er flatt og 90° er loddrett. Himmelretning seier noko om kva retning terrenget vender mot, og blir uttrykt som grader i høve nord. Desse terrengparameterane blir funne ved hjelp av eit 3*3 vindauge som flyttar seg gjennom terrengmodellen. Dei åtte næraste naboane til ei gitt celle avgjer gradienten og hellingsretninga ut i frå det tilta planet som passar best til cella i midten (Heywood et al., 2011).

Verktøyet «Area solar radiation» blei nytta til å rekne ut innkomande globalstråling på Hellstugubreen. Kvar celle får ein verdi for direkte stråling, diffus stråling og kor mange timar cella har direkte stråling. Resultatet blir gitt som global stråling i Wh/m². Innstrålinga kan bli kalkulert for enkeltdagar eller lengre periodar. Tre dagar blei plukka ut jamt fordelt over smeltesesongen, 1. mai, 10. juli og 15. august. Resultatet blei gjort om til W/m² ved å dividere på 24 timar. Globalstråling for smeltesesongen frå 1. mai til 30. september blei også rekna ut, og resultatet blei delt på alle timane som var med i utrekninga. Den globale strålinga avhenger mellom anna av geografisk posisjon, forholdet mellom diffus og direkte stråling og tilhøva i atmosfæren. Breiddegrada frå terrengmodellen blir brukt til å finne sola sin høgde og posisjon på himmelen. Vidare avgjer parameterane «transmissivitet» og «diffus del» kor mykje stråling som slepp gjennom atmosfæren, og kor stor del av den som er diffus stråling.

Transmissiviteten blei satt til 0,45 på grunnlag av målingar gjort ved Storbreen (Andreassen et al., 2008b). Parameteren diffus stråling blei satt til verdi for generelt klarvêr, 0.3 (ESRI, 2014).

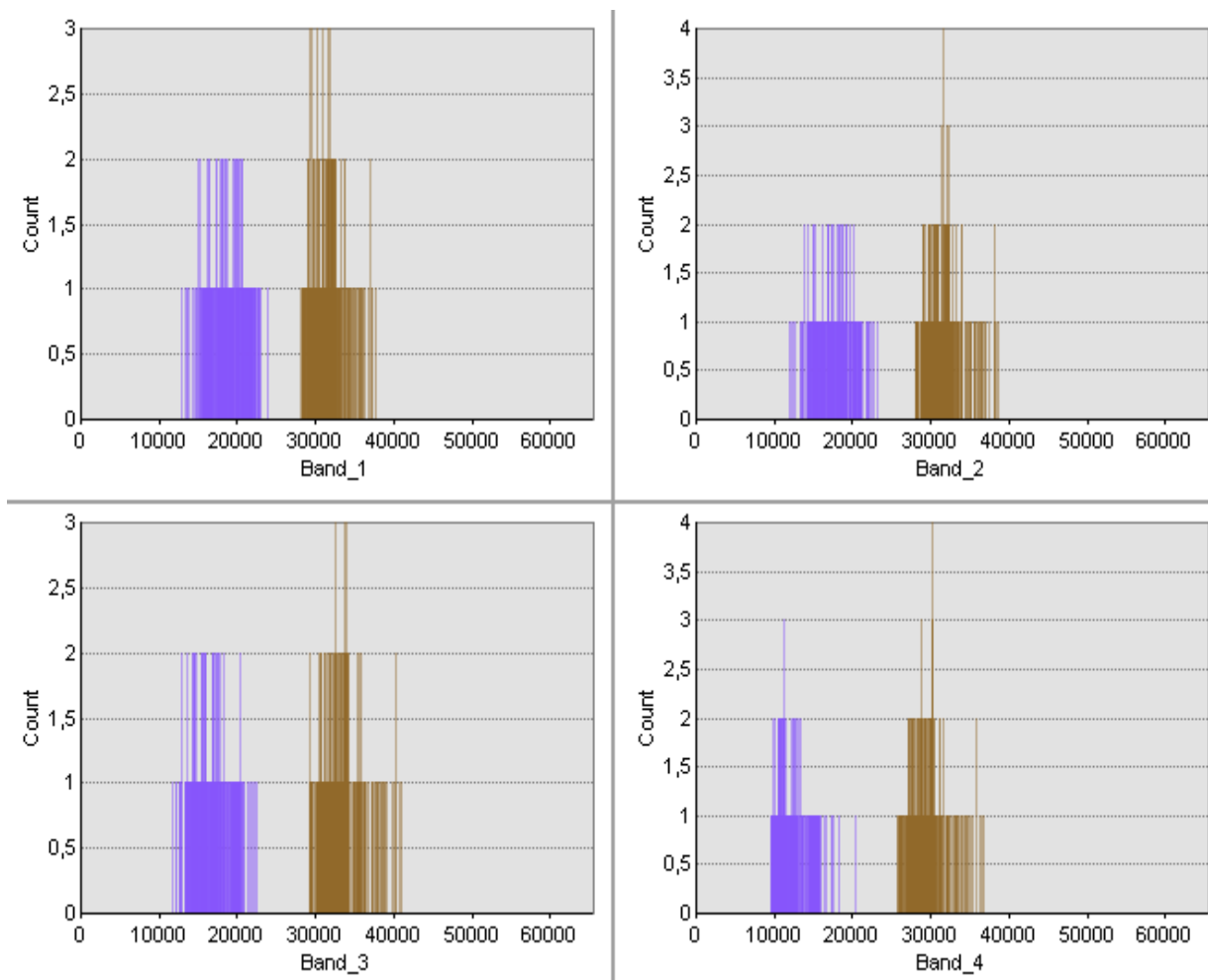
4.5.2 Klassifisering av snølinje

Landsat 8-bilete frå 2014 og 2015 blei lasta ned frå USGS sine nettsider og bilete av skyfrie dagar på breen klassifisert. Tabell 4.3 viser ei oversikt over kva satellittbilete som blei brukt. Dette blei gjort ved hjelp av «Image Classification» verktøyet i ArcMap®. Fire ulike band blei brukt i klassifiseringa, 2,3,4 og 5 som for Landsat 8 er banda raud, grøn, blå (RGB) og nær infraraud (NIR). Verktøyet «Composite bands» blei brukt for å lage eit raster datalag av dei ulike banda. Prøver av polygon blei plukka ut for å rekne ut den spektrale signaturen til dei ulike klassene, snø og is, som skulle brukast i den vegleia klassifikasjonen. Det blei plukka ut rundt 15 prøver i kvar klasse. Den spektrale signaturen til dei ulike klassene blei evaluert for å sjekke om det var nok skilnad mellom klassene. Dette blei gjort ved å studere histogram, punktdiagram og statistikk generert for dei ulike klassene (figur 4.6).

Tabell 4.3: Oversikt over satellittbileter som blei nytta i 2014 og 2015.

Dato tatt	Landsat 8 produktinformasjon ID	Koordinatar		Path	Row
		breiddegrad	lengdegrad		
13.07.2014	LC82000172014194LGN00	61.47742	7.57692	200	17
22.07.2014	LC81990172014203LGN00	61.47737	9.13183	199	17
15.09.2014	LC82000172014258LGN00	61.47716	7.56616	200	17
17.08.2015	LC82000172015229LGN00	61.47760	7.58606	200	17
11.09.2015	LC81990172015254LGN00	61.47728	9.12278	199	17

Dersom histogramma eller punktdiagramma overlappa blei polygona laga på nytt. Når polygona var godkjente og representerte klassene utan å overlappa blei det danna ei signaturfil for sjølve klassifiseringa. For å gjennomføre den vart *maximum likelihood-metoden* brukt. Denne metoden baserer seg på gjennomsnittet og variansen til dei ulike klassesignaturane. Sannsynet for at eit piksel høyrer til dei ulike klassene blir rekna ut, og pikselet hamnar i den kategorien det er størst sannsyn at den høyrer til (Lillesand et al., 2008).



Figur 4.6: Døme på histogram til evaluering av prøvepolygon for klassifisering 22. juli 2014. Histogramma viser skilnad i spektral karakteristikk for klassene snø (brun) og blåis/firn (lilla). Band 1-3 er banda RGB og band 4 er NIR i denne figuren.

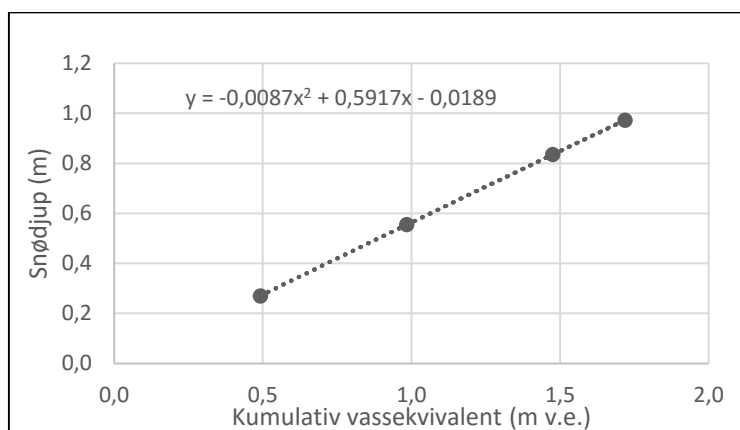
4.5.3 Massebalanse og utrekningsmetode

Vinterbalansen blei funne ved hjelp av sonderingane som blei gjort 1.–2. april 2014 og 29. april 2015. I tillegg til tettleiken målt ved H46, H44 og H13. Sjølve utrekninga av vinterbalansen blei gjort ved å finne gjennomsnittet av sonderingsverdiane innan kvart 50-meter høgdeintervall. Denne akkumulasjonen blei rekne om til vassekvivalentar ved hjelp av den nærast målte tettleiken, og volumbalansen blei funne ved å multiplisere med arealet til det gitte høgdeintervallet.

Ablasjonen på stakane blei også rekna om til vassekvivalentar ved hjelp av tettleiken målt på den næraste staken. To ulike måtar blei testa, bruk av gjennomsnittstettleiken i det aktuelle snøprofil og den kumulative vassekvivalenten med snødjupet (figur 4.7). Tettleiken til is

blei sett til 900 kg/m^3 , attverande snø til 600 kg/m^3 og firn til 700 kg/m^3 . Dette er typiske verdiar brukt av NVE (Kjøllmoen et al., 2010). Det blei også testa kva påverknad bruk av ulike tettleikar for firn har på sommarbalansen. Det er generelt få observasjonar av både tjukkeleik og tettleik av firn på fastlands-Noreg (Andreassen et al., 2015). Likevel viser data frå ei kjerneprøve på Nigardsbreen i mai 1987 firnverdiar frå 550 til 750 kg/m^3 . Dette var i ei prøve på 49 meter der rundt 24 m var firn. På bakgrunn av desse målingane og at firnen blir omdanna til is ved rundt 830 kg/m^3 (Cuffey og Paterson, 2010), blei verdiar mellom 550 og 800 kg/m^3 testa.

Sjølv utrekninga av sommarbalansen blei gjort ved hjelp av lineær regresjon, kvadratisk regresjon, manuell metode og ved hjelp av kriging i ArcMap®. Sommarbalansen for dei ulike punkta blei plotta mot høgde og regresjonslinja rekna ut i Excel®. Ved hjelp av regresjonslinja blei spesifikk sommarbalanse for kvart 50 m høgdeintervall funne. Volumbalansen for kvart høgdeintervall blei funne ved å multiplisere med arealet innafor det gitt høgdeintervallet. Deretter blei totalvolumet som hadde smelta bort funne ved å summere opp volumet innafor kvart høgdeintervall. Bs blei funne ved å dele volumbalansen på totalarealet av breen. Den manuelle metode fungerer slik at linja blir trekt mellom punktbalansane etter skjønn, og verdiar for kvart høgdeintervall blir gitt ut frå denne linja.



Figur 4.7 Tilhøvet mellom snødjup og kumulativ vassekvivalent ved stake H44 den 19. juni 2014.

Romleg interpolasjon

Kriging er ein romleg interpoleringsmetode som blir brukt når ein har verdiar for fleire punkt innafor eit geografisk område og vil estimere verdiane som ligg mellom. Kriging interpolerer desse verdiane basert på regresjon av observerte z-verdiar, vekta i høve romleg kovarians frå

ein funksjon eller eit semivariogram (Bohling, 2005). Semivariogrammet uttrykker korleis variablane endrar seg med avstanden mellom punkta. Det geografiske prinsippet om at likskapen mellom ting er stor i nær omkrins og aukar med avstanden blir nytta. Kriging har også den fordel at punkt blir vekta. Dette gjer at klyngeeffekten blir mindre fordi det blir tatt omsyn til avstanden mellom punkt i vektinga (Wackernagel, 2003).

Cokriging brukar informasjon frå ein eller fleire sekundærvariablar og kan i så måte gjere kriginga meir nøyaktig. I forhold til interpolering av målt sommarbalanse vil høgde vere ein passende sekundærvariabel, sidan ablasjonen minkar med høgda over havet. Metoden har likevel nokre ulemper. Den krev mykje meir estimering og dersom fleire ukjente autokorrelasjonar blir estimert vil cokriging introdusere meir variabilitet (ESRI, 2013).

Ordinær kriging og cokriging antek normalfordeling og at gjennomsnittet og semivariogrammet er stasjonært. Desse føresetnadane kjem ofte til kort (Hock og Jensen, 1999), og kan føre til underestimering av standardfeil i estimata. Empirisk Bayesian Kriging (EBK) tek omsyn til feil introdusert ved estimering av semivariogram modellen (Krivoruchko, 2012). Dette blir gjort ved å rekne ut hundrede semivariogram modellar i staden for ein. Stasjonære data er difor ikkje ein føresetnad (Krivoruchko, 2012).

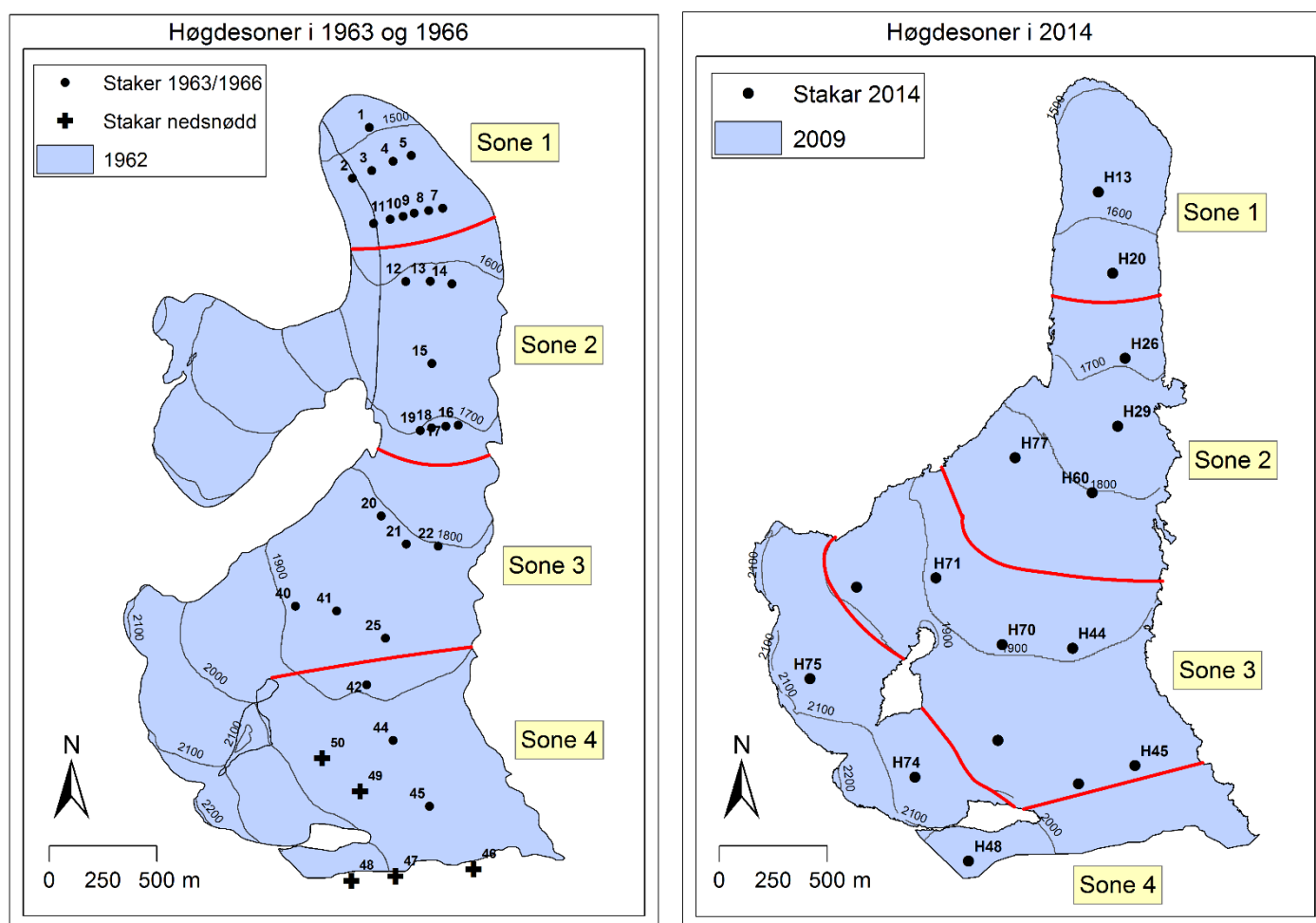
Desse tre metodane blei brukt for å interpolere og ekstrapolere sommarbalansen i 2014 over heile breoverflata. Først blei Spatial Analyst verktøyet i ArcMap® brukt og ordinær kriging valt som metode. Sfærisk semivariogram modell blei nytta og ein variabel søkeradius blei brukt for å finne tolv målepunkt til interpolasjonen. Fleire parameterar blei ikkje satt og den vidare utrekninga blei gjort automatisk.

For dei to andre metodane blei «Geostatistical Analyst» i ArcMap® nytta. Cokriging blei utført med DEM får Hellstugubreen i 2009 som sekundærvariabel. «Lag size» blei satt til 300 ut i frå gjennomsnittleg avstand mellom punkta, og lag blei satt til 14. Når det gjeld talet på naboar i utrekninga blei femten satt til maksimum og fem til minimum. EBK-metoden blei utført med ein lineær semivariogram type med same naboparameterar som cokriging.

4.5.4 Effekten av talet på stakar

Representativiteten til stakenettet blei først og fremst testa ved å sjå på skilnadar i sommarbalanse ved bruk av det utvida stakenettet og ved bruk av det opphavelige stakenettet. For å undersøkje nærare kor stor effekt talet på stakar og plasseringa av dei har på sommarbalansen blei ulike kombinasjonar av 4, 8 og 12 stakar plukka ut og sommarbalansen

rekna ut. Dette blei gjort både for 1963, 1966 og 2014. På denne tida var eit ekstensivt stakenettverk i bruk, noko som gjorde det mogleg å teste ulike kombinasjonar av mindre stakenett. Både for 4, 8 og 12 stakar blei 14 ulike kombinasjonar valt. Dei blei ikkje plukka ut tilfeldig, men frå fire soner med ulike høgder over havet. Dette blei gjort for å dekkje så mykje av høgdespenntet på breen som mogleg. I 2014 hadde sone 1 stakar frå 1500-1650 m.o.h., sone 2 1650-1850 m.o.h., sone 3 1900-2000 m.o.h. og sone 4 2000-2150 m.o.h (figur 4.8). På 60-talet hadde breen ei større utstrekking, og fleire stakar på bretunga men ingen målingar i botnane. Difor blei inndelinga noko annleis desse åra med sone 1 frå 1500-1600 m.o.h., sone 2 1600-1720 m.o.h., sone 3 1720-1880 m.o.h. og sone 4 1880-2150 m.o.h (figur 4.8).



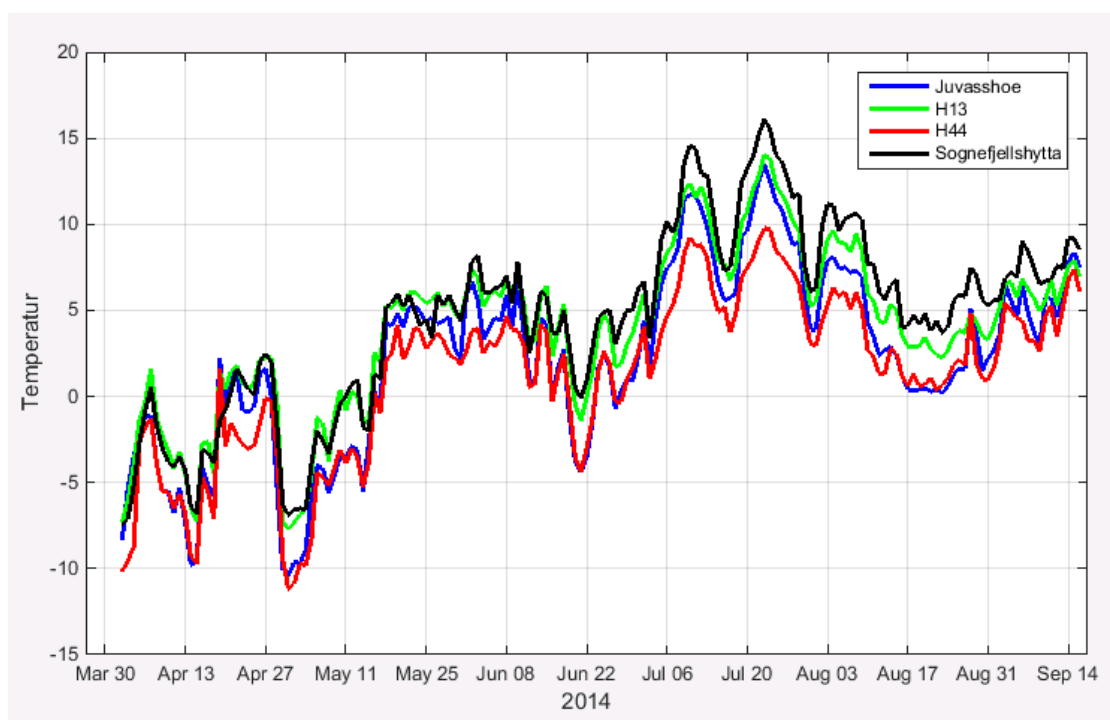
Figur 4.8: Høgdesoneinndeling på Hellstugubreen i 1963, 1966 og 2014.

5 Resultat

5.1 Temperatur og nedbør i området omkring breen

I 2014 blei det sett ut to nye automatiske vêrstasjonar (AVS) på ulike høgdenivå på Hellstugubreen (Tachon, 2015). For å kunne nytte vêr- og klimadata framover og bakover i tid må vêrstasjonar i nærleiken av breen nyttast. Difor blei det gjort ei samanlikning av temperaturen på Hellstugubreen og temperaturen ved vêrstasjonar i nærleiken av breen sommaren 2014. Dette for å finne ut om temperaturane samsvara, og dermed om stasjonane kunne nyttast i vidare analysar.

5.1.1 Temperatursamanlikning med to vêrstasjonar i nærleiken



Figur 5.1: Temperatur (°C) frå AVS på Hellstugubreen, H13 og H44, og vêrstasjonane Juvasshøe og Sognefjellshytta. Sjå Figur 4.5 for plassering av stasjonane.

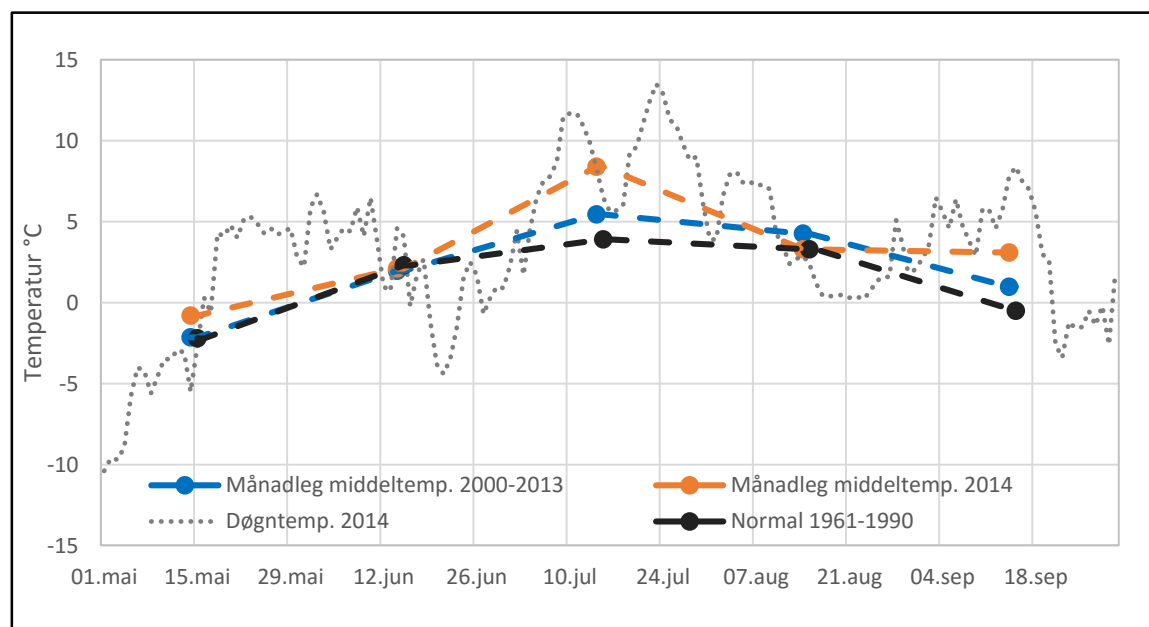
Figur 5.1 viser resultatet av samanlikning mellom døgnmiddeltemperaturen ved AVS-ane på Hellstugubreen og vêrstasjonane på Juvasshøe og Sognefjellshytta (figur 4.5). Temperaturane samsvarar godt med kvarandre og dei viser ein temperaturgradient i høve høgda. Dei lågast målte temperaturane er funne ved H44 (1900 m.o.h.) og Juvasshøe (1894 m.o.h.) som er plassert høgast i terrenget, medan Sognefjellshytta (1413 m.o.h.) som ligg lågast stort sett har

dei høgaste temperaturane. Korrelasjonen mellom vêrstasjonane blei rekna ut og ein korrelasjonskoeffisient på 0,98 funne både for Sognefjellshytta og H13 (1580 m.o.h.), og for Juvasshøe og H44, for døgnmiddeltemperatur. Korrelasjonen mellom døgnmiddeltemperatur ved H44 og Sognefjellshytta var 0,97 medan den var 0,99 for Juvasshøe og H13. Dette er svært høge korrelasjonar og begge vêrstasjonane kan nyttast på Hellstugubreen. Korrelasjonen mellom H13 og H44 er 0,99 for døgnmiddeltemperatur, og gjennomsnittleg temperaturgradient ligg på $0,008^{\circ}\text{C m}^{-1}$.

5.1.2 Massebalanseåret 2013 - 2014

Sommartemperatur

Samanlikna både med dei operative åra (2000-2013) på Juvasshøe og normalperioden 1961-1990 hadde sommaren 2014 stort sett høgare temperaturar (figur 5.2, tabell 5.1). Mai var varmare enn normalt, medan juni låg rundt normalen. Juli månad var derimot spesielt varm med to toppar mellom 11 og 14 grader ved Juvasshøe. August låg rundt normalen medan september var mykje varmare enn normalt, både for normalperioden 1961-1990 og 2000-2013. Middeltemperaturen i løpet av sommarmånadane (1.mai – 1.okt) var i 2014 $3,2^{\circ}$. Samanliknar ein middelveien for same periode for 2000-2013 og normalperioden 1961-1990 er desse høvesvis $2,2^{\circ}$ og $1,4^{\circ}$ (Tabell 5.1).



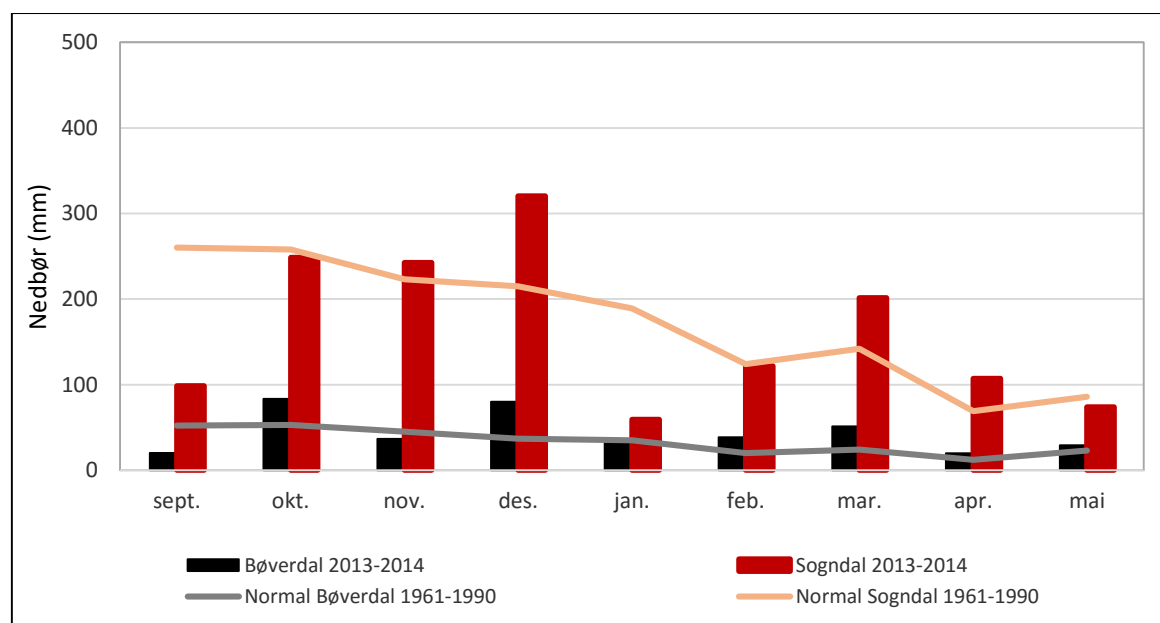
Figur 5.2: Temperaturdata frå Juvasshøe vêrstasjon. Månadleg middeltemperatur 2014 samanlikna med månadleg middeltemperatur i perioden 2000-2013 og normalen 1961-1990. Inkludert døgntemperaturen i 2014.

Tabell 5.1 Månadleg middeltemperatur ved Juvasshøe i 2014 samanlikna med månadleg middeltemperatur 2000-2013, normalen 1961-1990, og AVS ved stake H44 og H13.

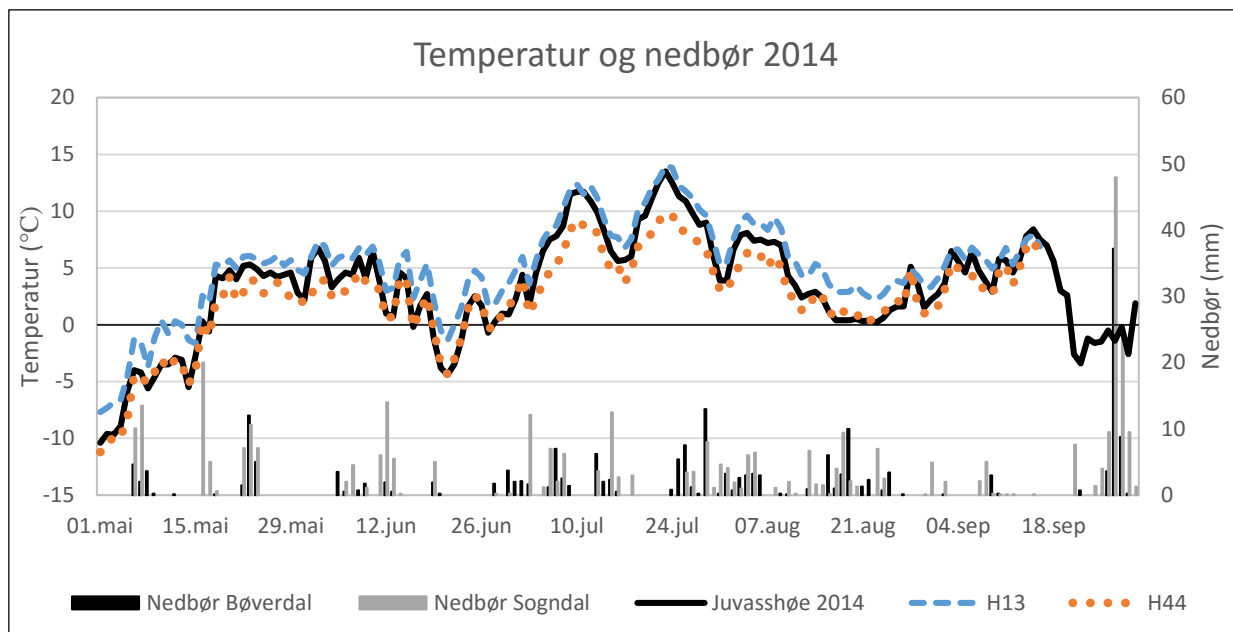
Månadleg middeltemperatur (°C)					
Månad	Juvasshøe 2000-2013	Juvasshøe 1961-1990	Juvasshøe 2014	H44 2014	H13 2014
Mai	-2,0	-2,2	-0,8	-1,6	1,2
Juni	2,0	2,3	2,1	1,5	4,1
Juli	5,4	3,9	8,4	6,3	9,5
August	4,5	3,3	3,3	2,6	5,1
September	1,0	-0,5	3,1	-	-
Middeltemperatur	2,2	1,4	3,2	2,2	5,0

Nedbørstilhøva

Nedbørsmengda vinteren (1. sept. – 30. mai) 2013-2014 ligg også over normalen 1961-1990. Totalt kom det 392 mm nedbør i løpet av vintermånadane (figur 5.3) ved stasjonen i Bøverdalen. Dette er om lag 23% meir enn normalen på 301 mm. Særleg var nedbørsmengda i oktober og desember 2013 høgare enn normalt (figur 5.3). I Sogndal kom det 1474 mm i same periode noko som er 16% av normalen 1961-1990 som ligg på 1265 mm.



Figur 5.3: Vinternedbøren 2013-2014 i Bøverdalen og Sogndal samanlikna med normalen 1961-1990.



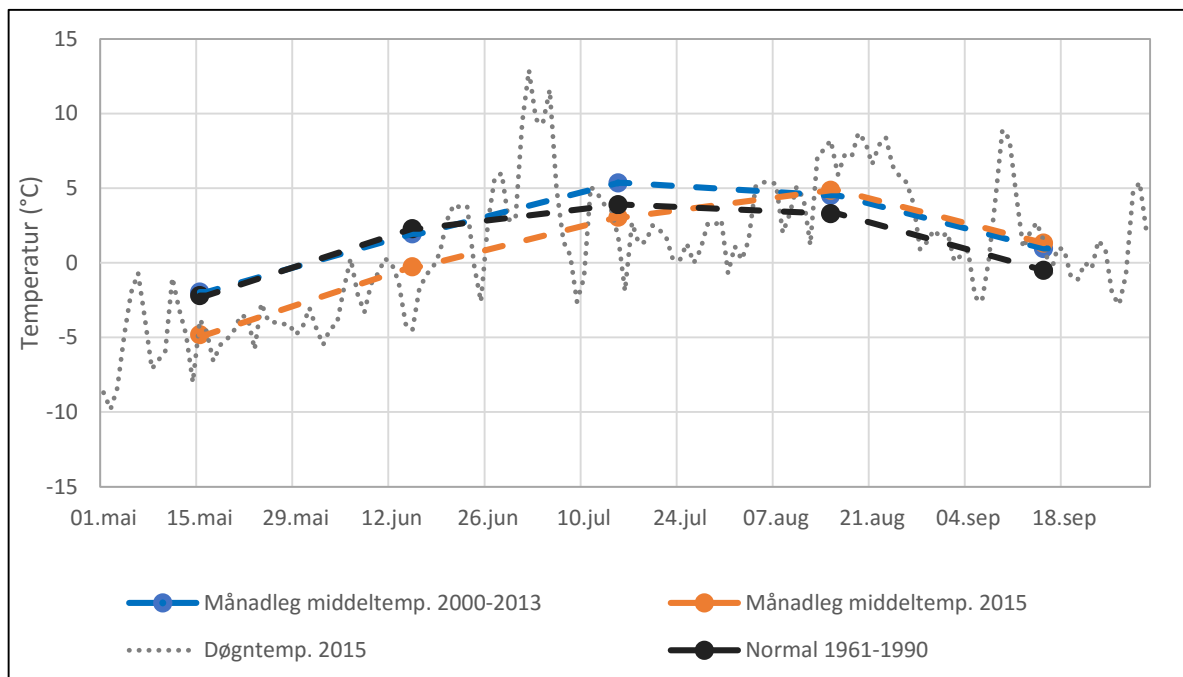
Figur 5.4: Samanstilling av temperatur frå Juvasshøe, H13, H44 og nedbør frå Bøverdal og Sogndal.

Sommaren 2014 hadde også eit ganske stort sommarsnøfall i midten av august. I perioden 16. – 25. august kom det 15,9 mm nedbør stort sett i form av snø (figur 5.4). I denne perioden blei det målt ein døgnmiddeltemperatur som varierte mellom 0,4 og 1,3°C ved H44, ved H13 varierte temperaturen i same periode mellom 2,2 og 3,6°C. I dei lågare delane av breen kom nedbøren som regn eller sludd og snøen blei ikkje liggjande. Frå stake H44 og oppover blei det målt mellom 10 og 24 cm nysnø. Det ser ikkje ut til å ha vore andre store sommarsnøfall i 2014.

5.1.3 Massebalanseåret 2014 - 2015

Sommartemperatur

Sommaren 2015 var kaldare enn normalt samanlikna med perioden 2000-2013 og normalen 1961-1990. Mai, juni og juli var høvesvis 2,8, 2,3 og 2,3 grader kaldare enn 2000-2013 medan august og september låg svært nær middelveien for denne perioden (figur 5.5, tabell 5.2). Samanlikna med normalen 1961-1990 var også mai, juni og juli kaldare enn normalt medan august og september var noko varmare. Middeltemperaturen for 2015 i månadane 1. mai –30. sept. ligg på 0,84°C noko som høvesvis er 1.3 og 0.5°C kaldare enn periodane 2000-2013 og 1961-1990 (tabell 5.2).

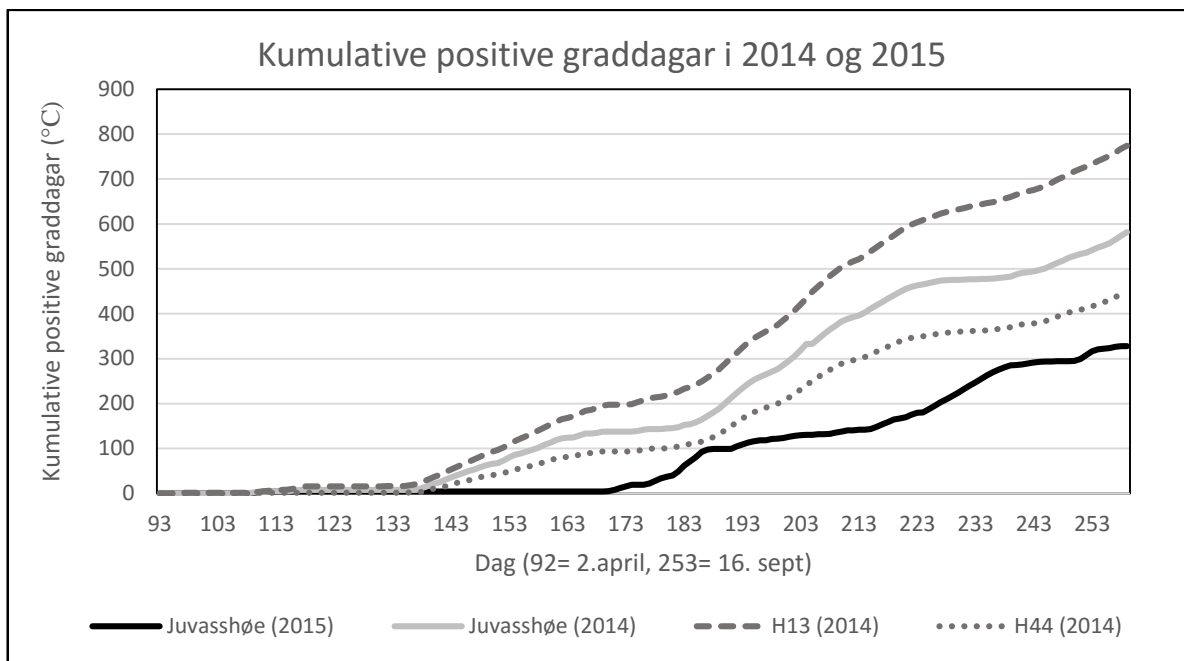


Figur 5.5: Temperaturdata frå Juvasshøe vêrstasjon. Månadleg middeltemperatur 2015 samanlikna med månadleg middeltemperatur i perioden 2000-2013 og normalen 1961-1990. Inkludert døgntemperaturen i 2015.

Tabell 5.2: Månadleg middeltemperatur ved Juvasshøe i perioden 2000-2013, i 2015 og normalperioden ved Juvasshøe 1961-1990.

Månadleg middeltemperatur (°C)			
Månad	Juvasshøe 2000-2013	Normal 1961-1990	Juvasshøe 2015
Mai	-2,0	-2,2	-4,8
Juni	2,0	2,3	-0,3
Juli	5,4	3,9	3,1
August	4,5	3,3	4,9
September	1,0	-0,5	1,3
Middelverdi	2,2	1,36	0,84

For å illustrere temperaturskilnaden dei to sommarsesongane 2014 og 2015 viser figur 5.6 kumulative positive graddagar frå 2. april til 16. september (perioden med AVS data på breen i 2014). Kumulative positive graddagar vil seie summen av alle positive temperaturar i løpet av perioden. I dette tilfelle er gjennomsnittleg døgntemperatur nytta. Totalt hadde året 2014 581 positive graddagar ved Juvasshøe, medan 2015 hadde 328 positive graddagar.

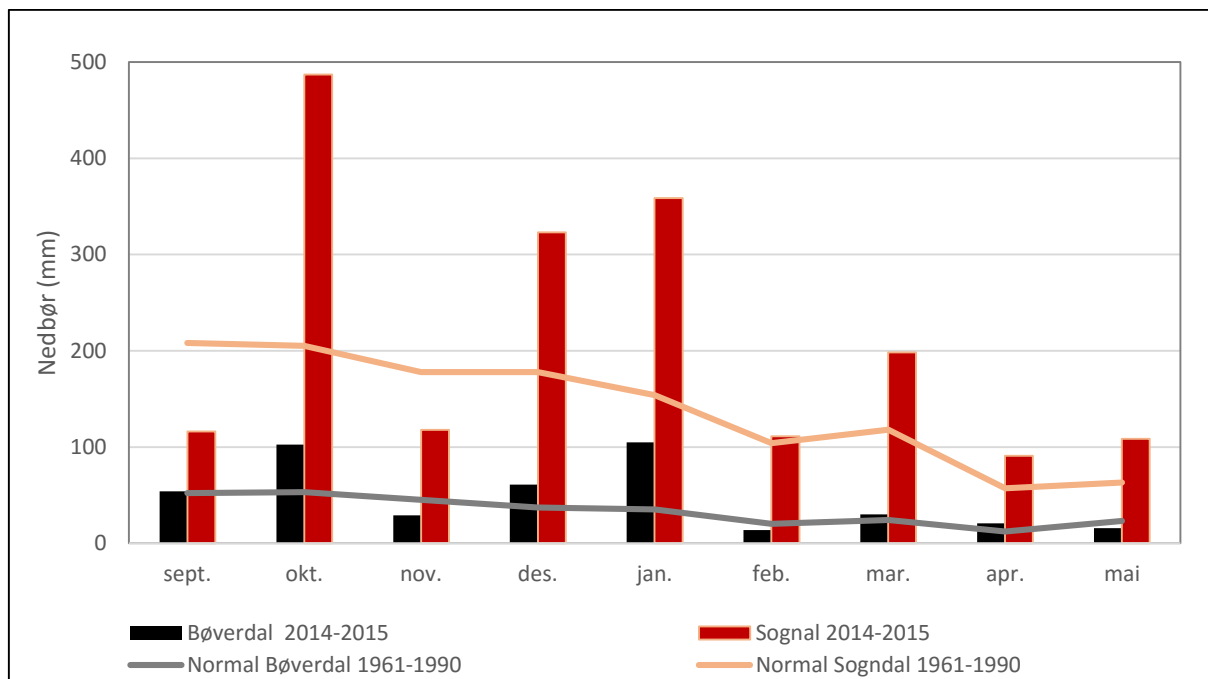


Figur 5.6: Kumulative positive graddagar ved H13 og H44 i 2014 og ved Juvasshøe i 2014 og 2015. Perioden er frå 2. april til 16. september.

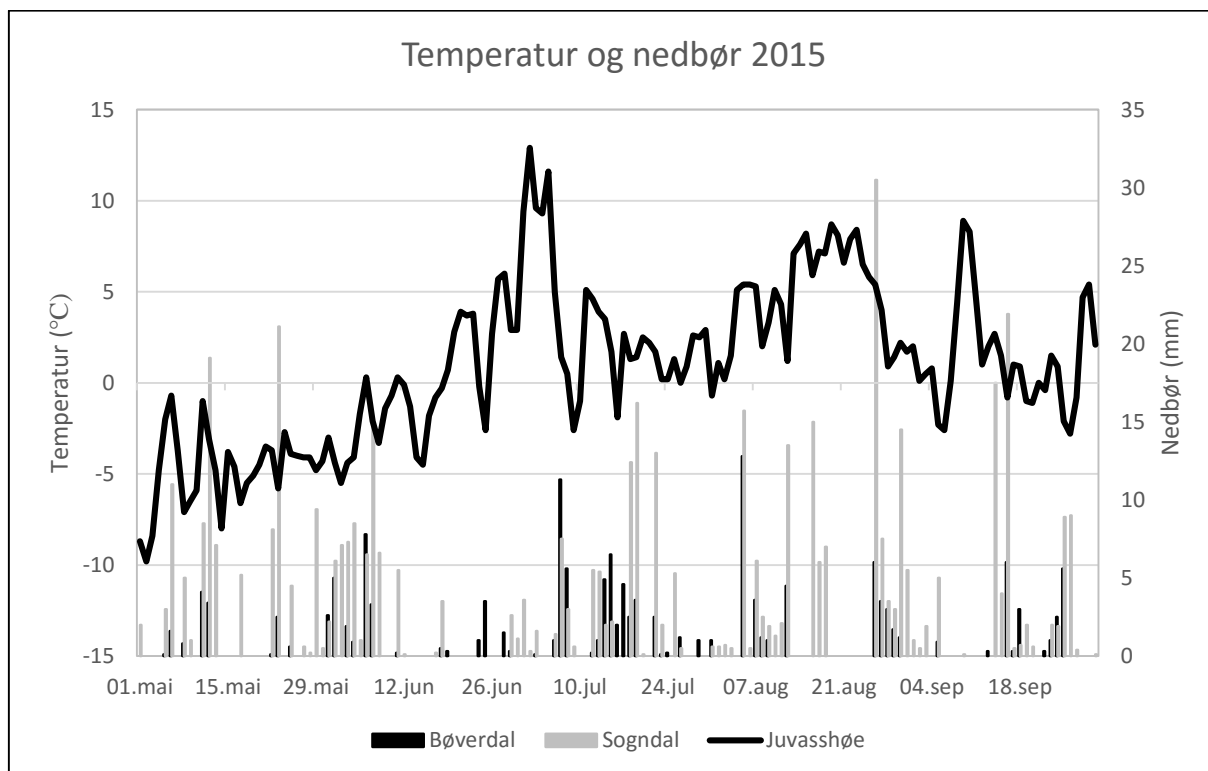
Nedbørstilhøva

Vinteren (1. sept. – 30. mai) 2014-2015 hadde som vinteren året før meir nedbør enn normalen 1961-1990 både ved stasjonen i Bøverdalen og Sogndal. Spesielt var månadane oktober, desember og januar nedbørsrike (figur 5.7). Totalt kom det 431 mm nedbør i løpet av vinteren i Bøverdalen (figur 5.7), noko som er 43 % over normalen 1961-1990 som var på 301 mm. I Sogndal kom det totalt 1912 mm nedbør medan normalen 1961-1990 ligg på 1265 mm. Dette gir ein nedbør på 51 % meir enn normalt i Sogndal.

Vidare ser dei låge temperaturane fram til slutten av juni ut til å ha gitt ein del snøfall i starten av smeltesesongen på Hellstugubreen (figur 5.8). Fram til 18. juni var det berre to dagar med plussgrader og då var temperaturen 0,3°C. Totalt kom det 176 mm nedbør i perioden 1. mai – 18. juni. I Bøverdalen kom det 35,5 mm i same periode. I juli er det også fleire dagar under og rundt 0°C, men dagane er veldig spreidd og nedbørsmengdene er små.



Figur 5.7: Vinternedbør 2014-2015 ved værstasjonane Bøverdalen og Sogndal, samanlikna med normalen 1961-1990 ved stasjonane.

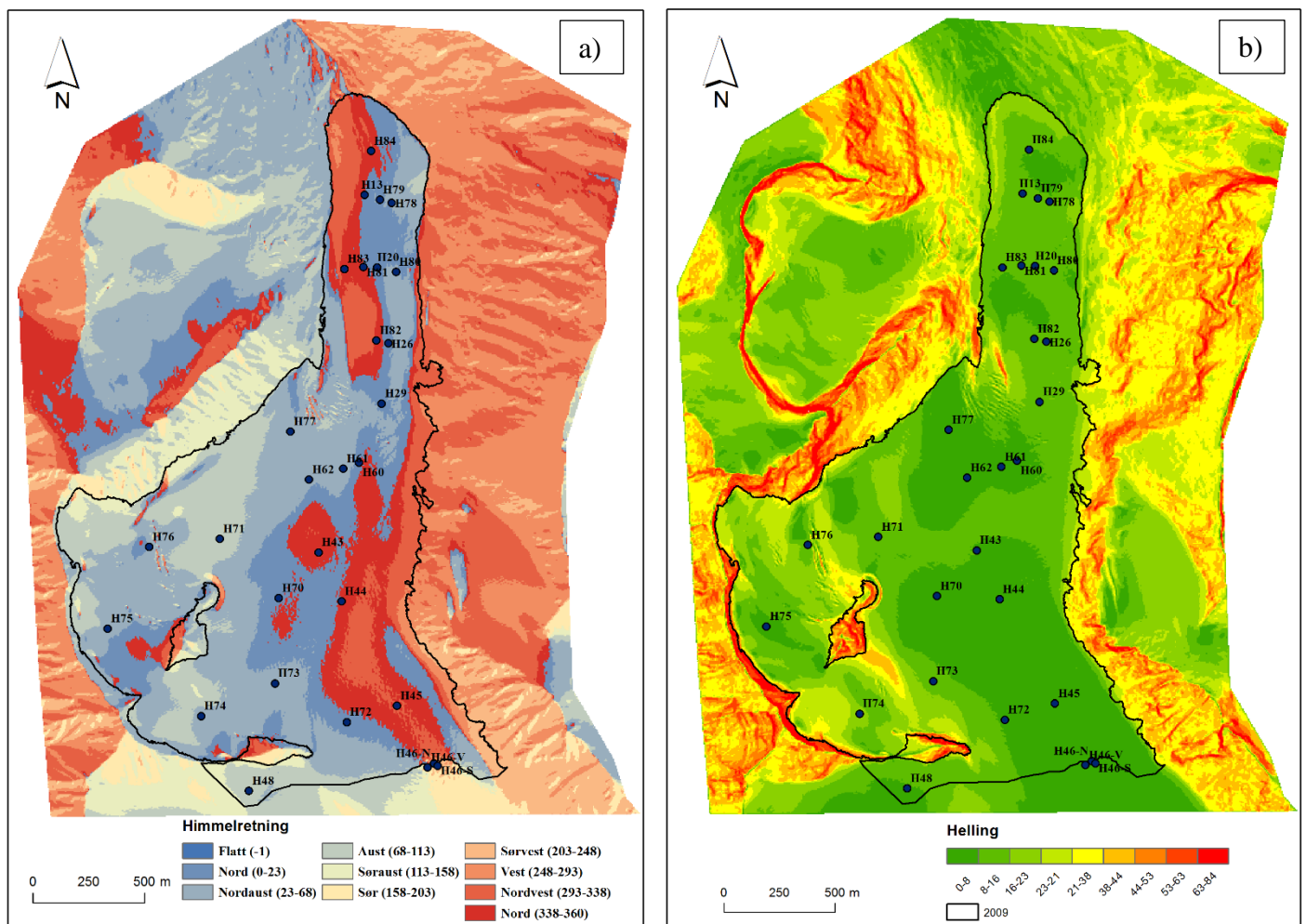


Figur 5.8: Temperatur og nedbør sommaren 2015. Temperaturdata er henta frå værstasjonen Juvasshøe og nedbørsdata frå Bøverdalen og Sogndal.

5.2 Glasiologiske undersøkingar

5.2.1 Terrenganalyse

Terrenganalyse av den digitale terrengmodellen frå 2009 gir ei detaljert oversikt over terrenget på breen og plasseringa av stakane i høve helling og himmelretning. Generelt vender Hellstugubreen i nordleg retning. Sjølvne bretunga vender naturleg etter rørsleretninga mot nordvest i vest og nordaust i aust og mot nord på midten. Figur 5.9 a viser at dei fleste av stakane står i terreng som heller nordover. Dei tre botnane på vestsida av breen vender stort sett aust/nordaust, og stakane som er plassert her vender alle nordaust bortsett frå H48 som vender aust. Sentralt på breplatået ved stake H60 og H77 vender breen først mot nordaust før den hallar over i ei meir nordleg/nordvestleg retning høgare oppe. Nærare botnane vender breen aust/nordaust. Stakane i området er fint spreidd stadar som vender i ulike retningar. Heile breen er kransa inn av høge bratte fjell og hovuddelen av dei vender mot vest og nordvest. Fjella på vestsida av ablasjonssona vender mot nordaust og dreiar av mot søraust når



Figur 5.9: a) Himmelretning og b) Helling på Hellstugubreen (frå DEM 2009).

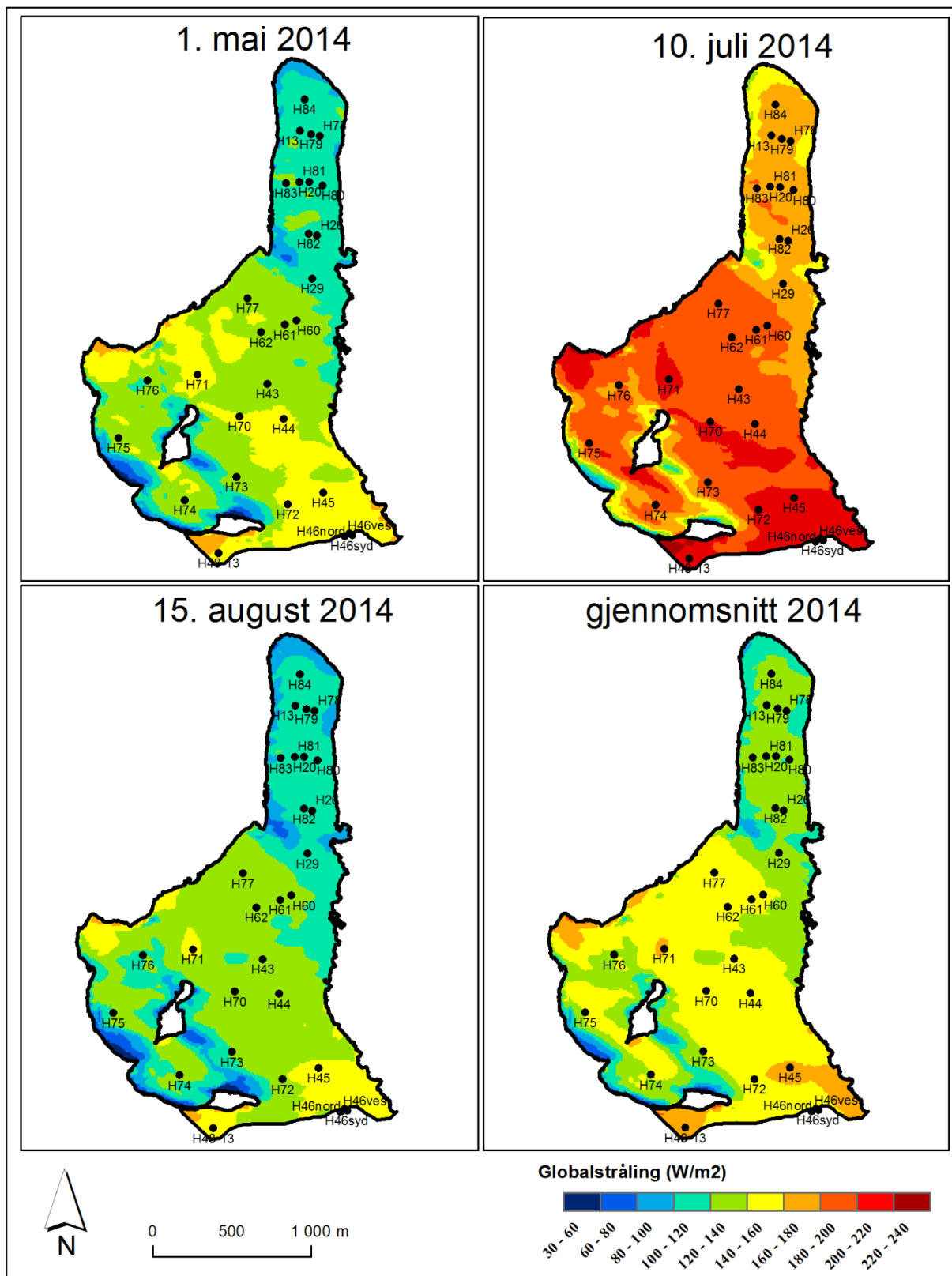
breen flatar ut høgare oppe. Stakane i ablasjonssona er tettare omkransa av bratte sider, medan stakane i akkumulasjonssona har eit noko meir ope terreng rundt. Dette inneber at stakane i ablasjonsområdet blir liggande meir i skugge. Eit unntak er botnane som stort sett også får meir skugge på grunn av fjella rundt.

Hellstugubreen har ei gjennomsnittshelling på 12° ut i frå DEM 2009 og er ikkje ein spesielt bratt bre (figur 5.9 b). Botnane i aust skil seg frå resten av breen og har bratte parti mellom 30° og 45° . Desse områda ($30-45^\circ$) har også meir sprekker noko som gir endå meir ujamt terreng. Figur 5.9 b syner hellinga på breen der gul og raudt representerer bratte områder. I tillegg til botnane er det eit område øvst på bretunga som skil seg ut, her er det også bratt og mykje sprekker. Stakane på breen er plassert i områder med helling frå 1° til 16° . Stakane i ablasjonsområdet står i helling mellom 8 og 12° bortsett frå H62 som står på 5° . Vidare oppover langs breen står stakane på mellom 1 til 12° . I botnane er stakane også plassert i områder med minst mogleg helling, stake H74 og H76 har det brattaste terrenget, med 16° og 11° .

Globalstråling

Analyse av globalstråling viser at bretunga generelt tek imot mindre stråling enn resten av breen i løpet av smeltesesongen (figur 5.10). Mengda stråling ved dei ulike stakane under 1800 m.o.h. ser ut til å vere ganske lik, mellom $120-140 \text{ W/m}^2$. Figur 5.10 syner variasjonen i globalstråling på breen tre ulike dagar spreidd over smeltesesongen, i tillegg til den gjennomsnittlege strålinga i perioden 1. mai til 30. september. Den øvste botnen som vender mot aust får mest globalstråling i løpet av smeltesesongen, i tillegg til eit område heilt i søraust av breen ved stake H45 og eit lite område ved stake H71.

I akkumulasjonsområdet er det litt større skilnad i globalstråling for stakar ved same høgde. H71 har i gjennomsnitt 11 W/m^2 meir stråling enn H44 og H70. Vidare ligg H45 i eit område med meir stråling medan H73 som ligg nærare fjellsidene får meir skugge og lågare stråling. Skilnaden er på 20 W/m^2 . Stake H76 ser også ut til å ligge nær eit område med mindre globalstråling enn dei andre stakane i botnane, skilnaden er 33 W/m^2 mellom H48 og H76. Den gjennomsnittlege globalestrålinga på Hellstugubreen i smeltesesongen ligg på 138 W/m^2 , rekna ut som middelverdien til alle cellene innafor breen. Studerer ein gjennomsnittet på det utvida stakenettet ligg det på 139 W/m^2 . Det fangar med andre ord veldig godt variasjonen i globalstråling på breen. Det opphavlege stakenettet til NVE har eit gjennomsnitt på 143 W/m^2 noko som heller ikkje skil seg mykje frå det totale gjennomsnittet.



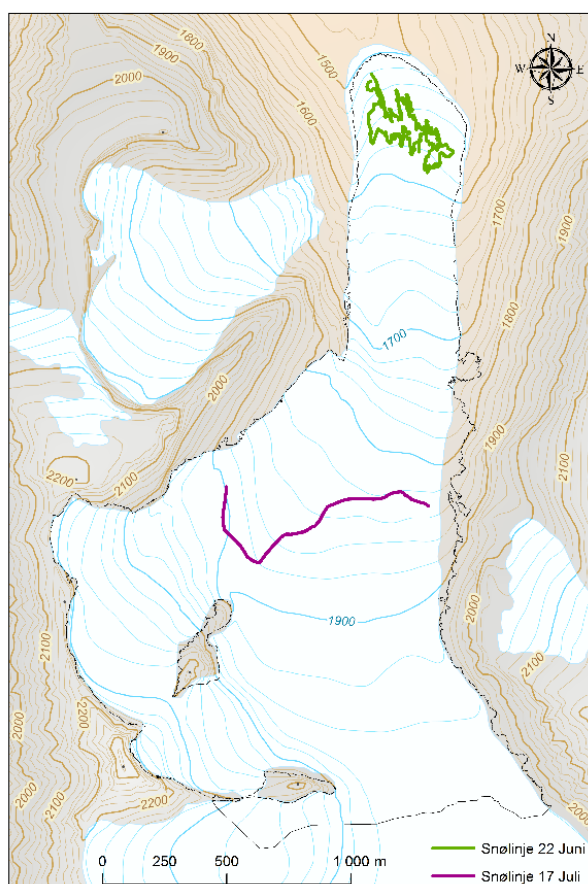
Figur 5.10: Globalstråling (W/m^2) ved tre utvalgte dager, 1.mai, 10. juli, 15. august og gjennomsnittet for perioden 1. mai - 30. september.

5.2.2 Snølinje

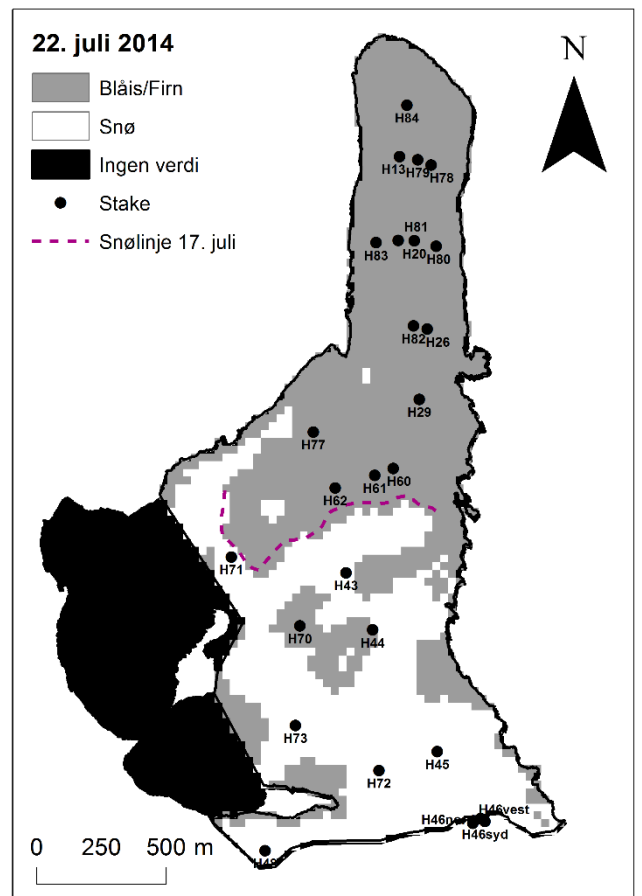
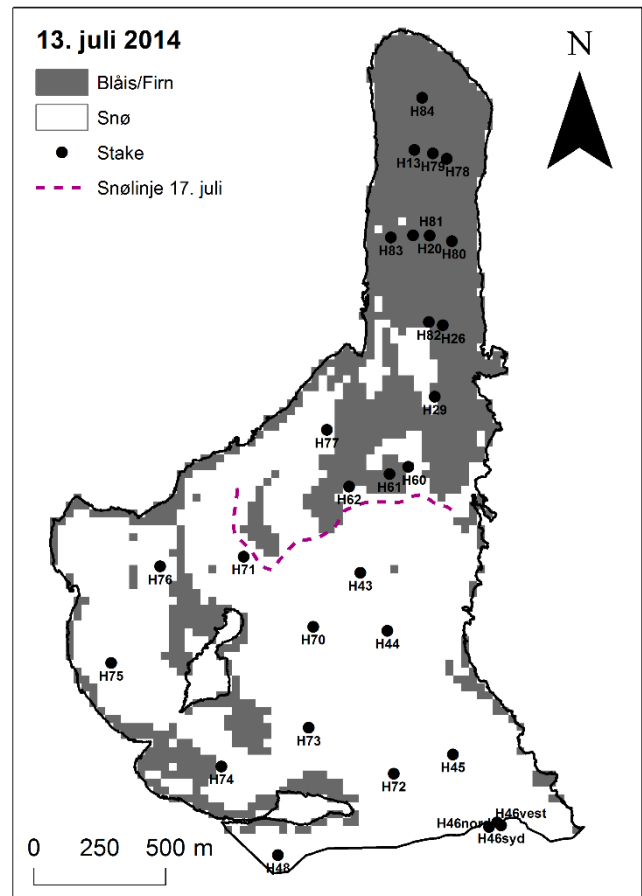
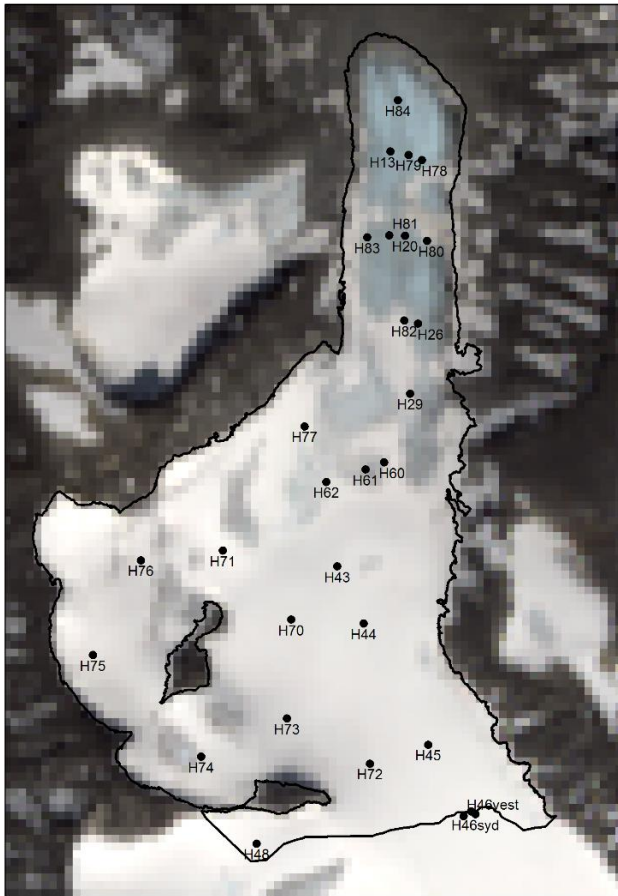
Observasjonar og analyse 2014

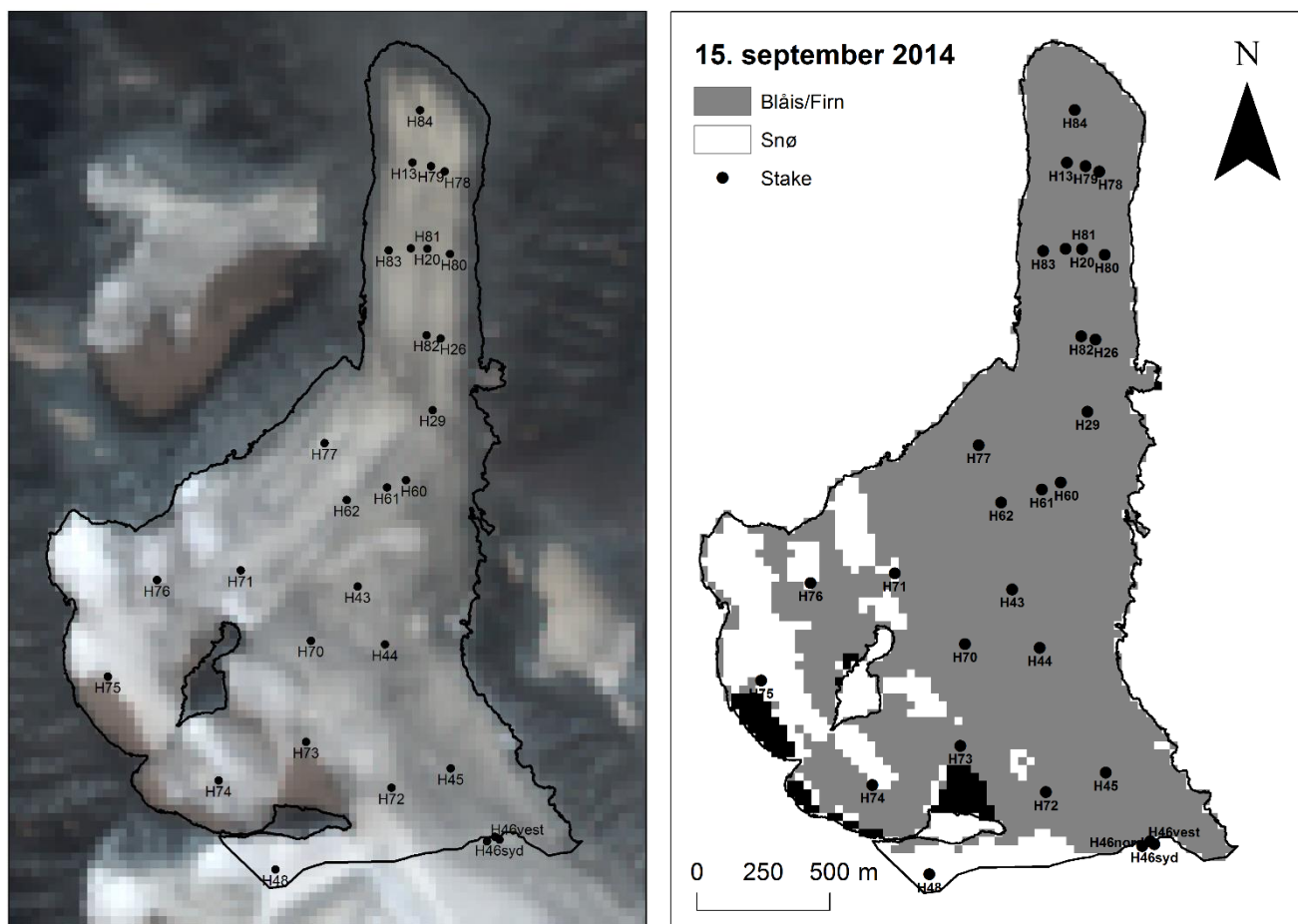
Registrering av snølinja viser utviklinga av smeltinga i løpet av ablasjonssesongen 2014 (14.mai – 16.sept.). 17. juni var det berre eit lite isfritt område i nedre del av bretunga. Om lag ein måned seinare, 22. juli, låg snølinja rundt 1850 m.o.h. (figur 5.11). På grunn av sommarsnøfall i august var det umogleg å sei kvar snølinja låg på denne tida. Det blei heller ikkje funne eigna Landsat 8 bilete frå august på grunn av at vêrtilhøva ikkje klaffa denne månaden.

Satellittbileter frå skyfrie dagar blei funne for 13. juli, 22. juli og 15. september. Figur 5.12 viser bilete frå desse dagane inkludert klassifisering av dei. Desse bileta syner tydeleg korleis snøtilhøva var på breen i midten og slutten av smeltesesongen. 13. juli låg snøgrensa rundt 1820 m.o.h. med snøfrie områder i botnane kring dei mest oppsprekte områda. 15. september var snøen smelta bort heilt opp til bandet ved stake H46. I følge klassifiseringa var det då berre attverande snø i botnane og i tilknytning til dei. Figur 5.13 til 5.16 viser bilete over forholda på Hellstugubreen under feltarbeidet 16 – 17. september.



Figur 5.11: Snølinje digitalisert under feltarbeid 22. juni og 17. juli.





Figur 5.12: Landsat 8 bilete frå 13. juli, 22. juli og 15. september 2014. Inkludert klassifisering i klassene blåis/firn, snø, skugge og for 22. juli områder med ingen verdi.



Figur 5.13: Bilete frå H45 mot den sørlegaste botnen og snølinja 16. september 2014 (foto: Oda J. Røyset).



Figur 5.14: Bilete frå hytta og nordover mot botnen ved H74, 16. september 2014 (foto: Oda J. Røyset).



Figur 5.15: Bilete frå H71 og vidare oppover breen, 17. september 2014. Attverande snø i tilknytning til botnane. (foto: Liss M. Andreassen).



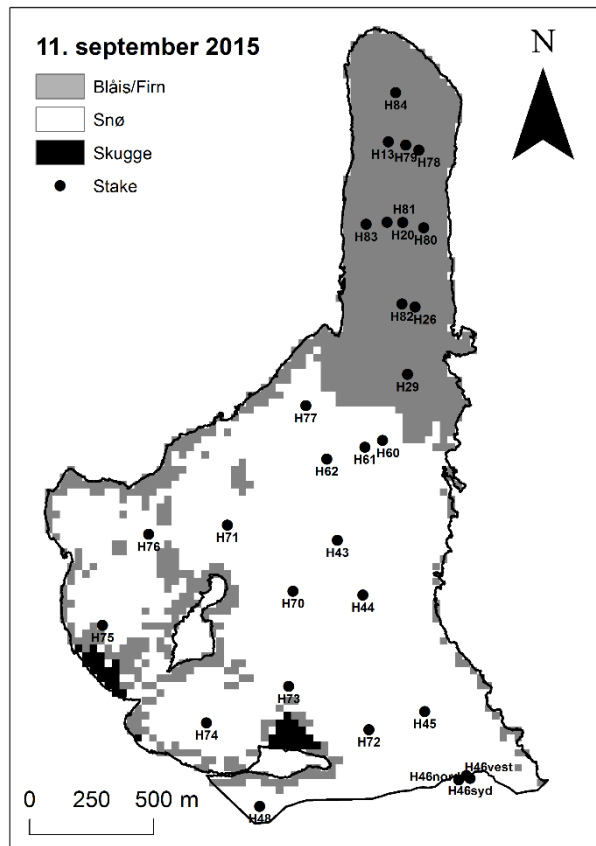
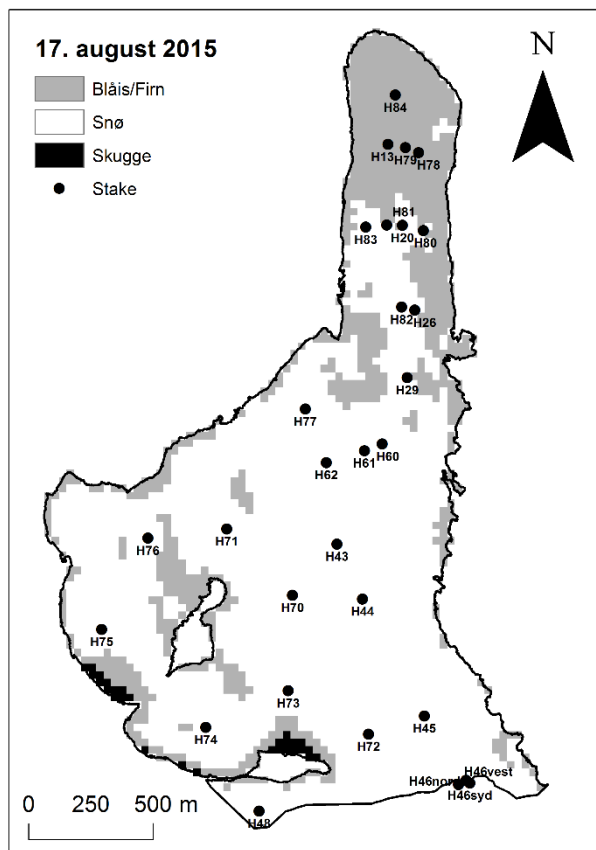
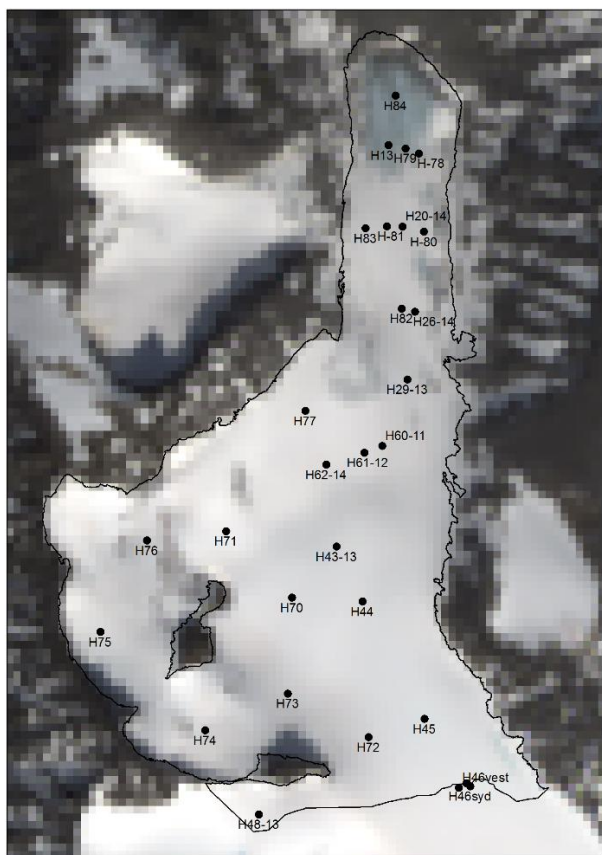
Figur 5.16: Bilete frå H45 mot den midterste botnen (H74) 16. september 2014. Både snø og is i botnen (foto: Oda Jonette Røyset)

Observasjonar og analyse 2015

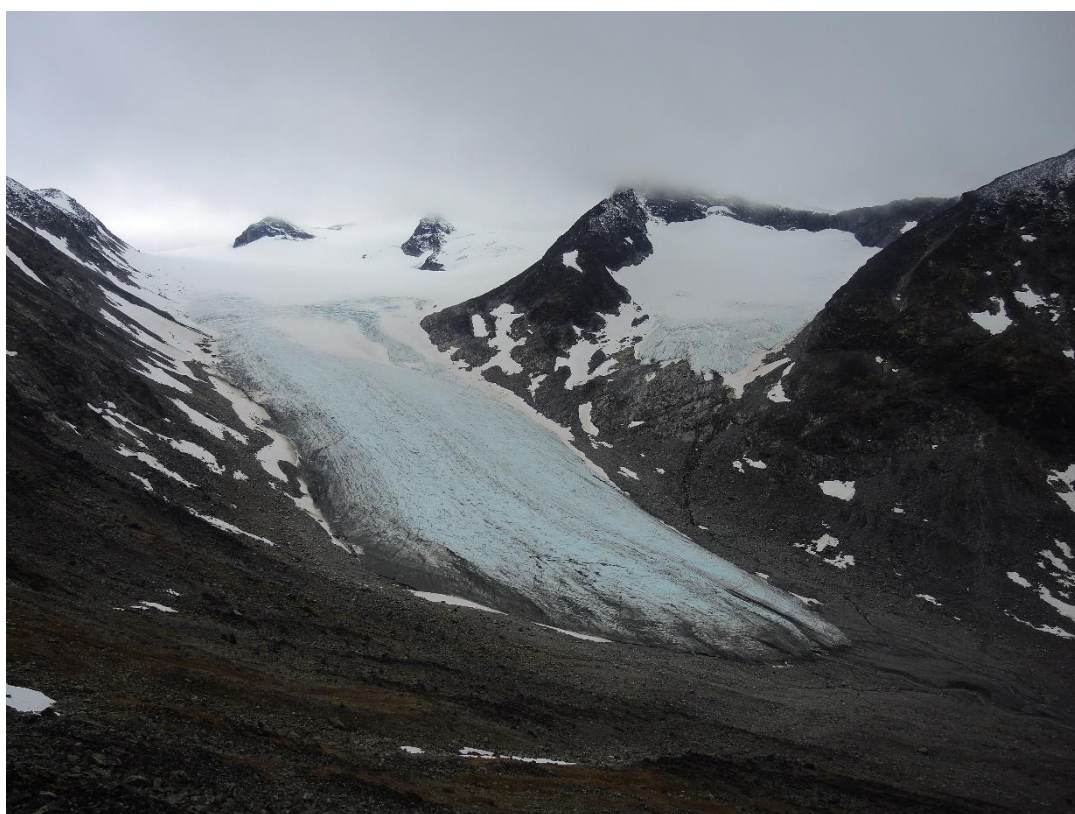
Under feltarbeid 10. – 14. juli var heile breen framleis snødekt, ved neste vitjing 23. september låg snølinja like under H60 om lag 1790 m.o.h. (figur 5.17). Satellittbilete som kunne brukast for 2015 blei tatt 17. august og 11. september. Klassifiseringa viser at det i midten av august låg snø igjen på sjølve bretunga ned til om lag 1600 m.o.h. Flekkar og områder med blåis var framme på dette tidspunktet i sprekkeområdet i nordvest, i nærleiken av H71 og i sprekkeområda i botnane. Den 11. september går snøgrensa i følge klassifiseringa rundt 1780 m.o.h. På sjølve satellittbilete ser det i tillegg ut til å ligge litt snø igjen mellom stake H29 og H26. Botnane har nokre områder med blåis men elles er breen stort sett snødekt over snølinja den 11. september 2015.

Bilete frå fotopunkt 2014 og 2015

Bileta frå fotopunktet H-FOTO (figur 5.18) september 2014 og 2015 viser skilnadane i tilhøva på breen ved minimumsmåling dei to åra. I 2014 var omlag all snøen smelta bort, men biletet viser at det var flekkar med snø attende som klassifiseringa ikkje fekk med seg (figur 5.18). Dette gjeld sprekkeområdet vest i brefallet som har eit konkavt parti der det sannsynlegvis samlar seg mykje snø, i tillegg til eit område i bakken mellom stake H60 og H43. I 2015 låg det snø igjen i dei same områda på bretunga, berre i større mengder, men den blei heller ikkje her klassifisert som snø. I følge klassifiseringa var det 14% av totalarealet på breen som hadde attverande snø 15. september 2014, medan heile 63% av arealet hadde attverande snø 11. september 2015.



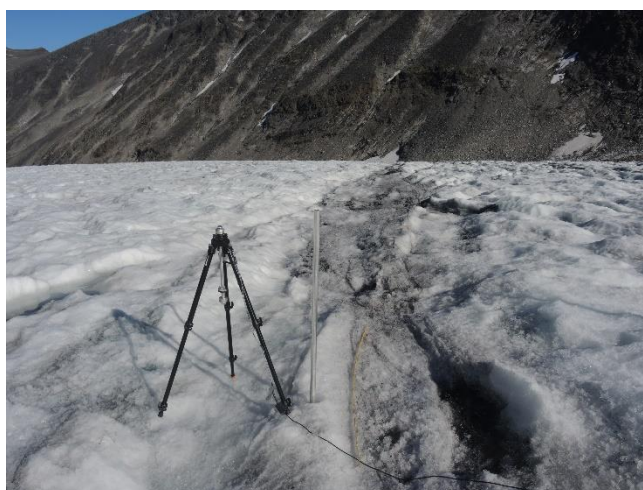
Figur 5.17: Landsat 8 bilete frå 17. august 2015 og Landsat 8 bilete frå 11. september 2015. Klassifiseringa er gjort med klasser for snø, is og skugge.



Figur 5.18: Bilete frå fotopunktet, HFOTO (for plassering av fotopunkt sjå figur 4.1). Det øvste bilete er frå 16.09.2014 og det nedste er frå 23.09.2015. Bileta syner tilhøva på breen under minimumsmålingane (foto: Oda J. Røyset).

5.2.3 Albedo

Albedomåling og observasjon av overflatetilhøva ved stakane blei gjort 16. – 17. september 2014. Ved nokon av stakane var det stor skilnad i overflata med alt frå mørkt breslam til kvit pjoletteris (figur 5.19). Snøen var smelta bort heilt opp til bandet ved stake H46, men nokre få stakar hadde snø eller firn attende. Skilnaden i albedo var fleire stadar stor for stakar ved same høgde (figur 5.20, tabell 5.3). Som til dømes ved stake H81 og H83 som hadde ein skilnad på 0.22.

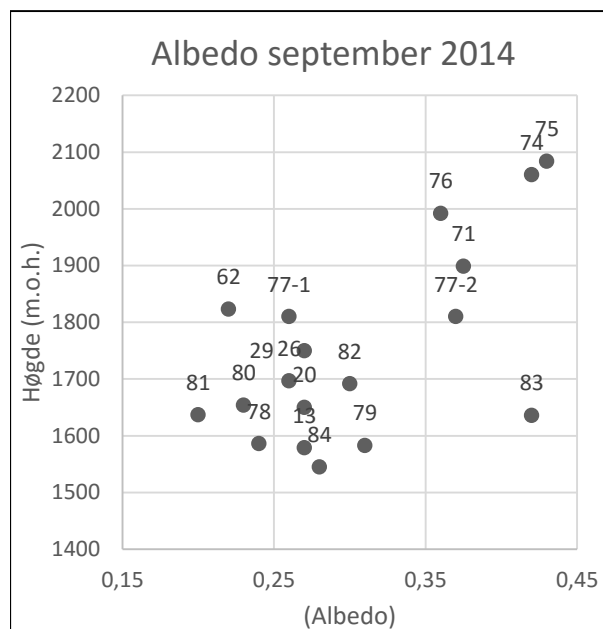


Figur 5.19: Albedomåling ved stake H77-2. Det er store mørke områder rundt staken, spesielt på høgre side i biletet.

Dette kunne også vere tilfelle ved små avstandar, slik som ved stake H77-1 og H77-2. Desse stakane står om lag 2 m frå kvarandre og tabell 5.3 syner at skilnaden i albedo var 0,11 i gjennomsnitt under målinga i september 2014.

Tabell 5.3: Albedomåling 16. – 17. september 2014.

Stake	Albedo	Gjennomsnittleg albedo
84 (1545)	0.34, 0.22	0.28
13 (1579)	0.31, 0.23, 0.28, 0.26	0.27
79 (1583)	0.31	0.31
78 (1586)	0.24	0.24
83 (1636)	0.45, 0.38	0.42
81 (1637)	0.17, 0.23, 0.16, 0.24	0.20
20 (1650)	0.28, 0.25	0.27
80 (1654)	0.31, 0.15	0.23
82 (1692)	0.36, 0.23	0.30
26 (1697)	0.26	0.26
29 (1750)	0.27	0.27
62 (1823)	0.23, 0.21	0.22
77-1 (1810)	0.23, 0.28	0.26
77-2 (1810)	0.37	0.37
71 (1899)	0.40, 0.35	0.38
74 (2060)	0.41, 0.43	0.42
75 (2084)	0.43	0.43
76 (1992)	0.33, 0.38	0.36



Figur 5.20: Punktdiagram av albedo målt 16 – 17. september 2014.

Observasjonar av kva type overflater som blei målt viser at områder med mørk is og pjoletteris med brestøv hadde lågast albedo (tabell 5.4). Attverande snø og lys is eller firn ga høgast albedo. Generelt hadde stakane ein albedo som i følge Cuffey og Paterson (2010) er typisk for materialrik is og rein is (0,20-0,35) eller gammal materialrik våt snø (0,35- 0,45).

Tabell 5.4: Eit utval av albedo målt ved forskjellige typar overflater 16. - 17. september.

Overflate	Albedo				Gjennomsnitt
Kvit pjoletter is	0,34	0,31	0,45	-	0,37
Attverande snø	0,43	0,40	-	-	0,42
Mørk is	0,23	0,28	0,23	0,21	0,24
Lys is/firn	0,41	0,43	0,37	-	0,40
Pjoletteris med brestøv	0,24	0,23	0,28	0,25	0,25

5.2.4 Temporær ablasjon 2014

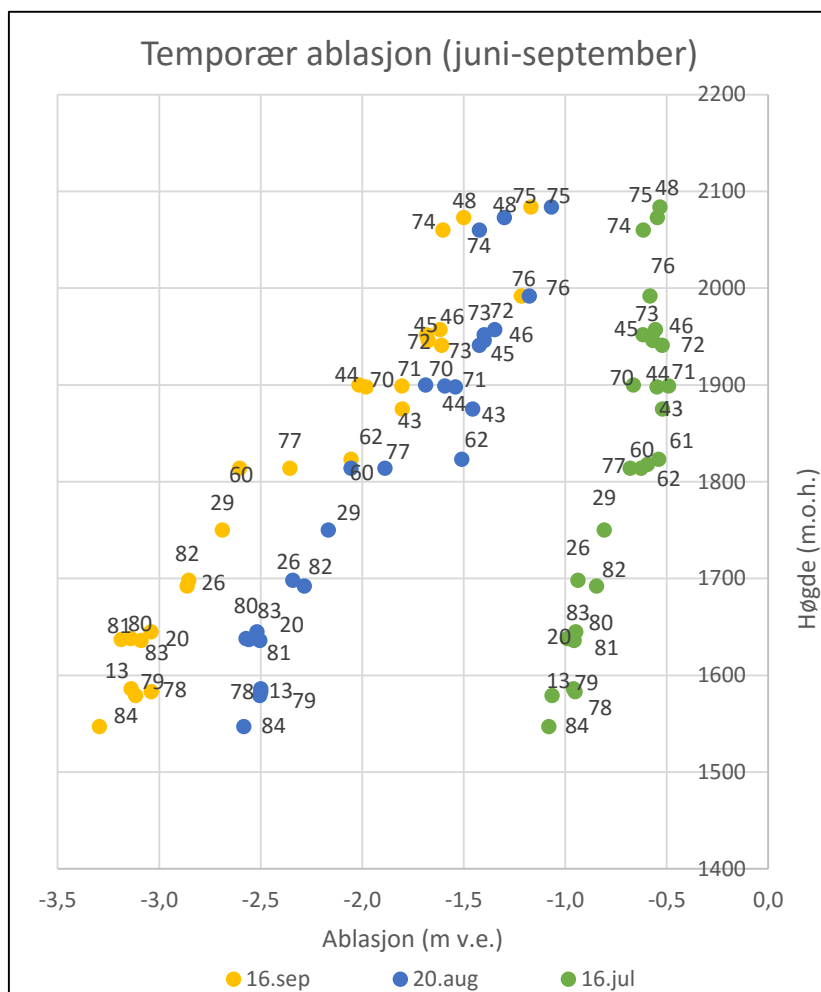
To punktdiagram viser spesifikk ablasjon fram til visse tidspunkt (figur 5.21, figur 5.24).

Figur 5.21 gir oversikt over alle stakane med måling frå 19. juni til 16. september, den viser ikkje total ablasjon for heile smeltesesongen fordi mange av stakane ikkje var satt ut før i juni.

Figur 5.24 viser stakar med full massebalanse med måling frå 14. mai til 16. september 2014.

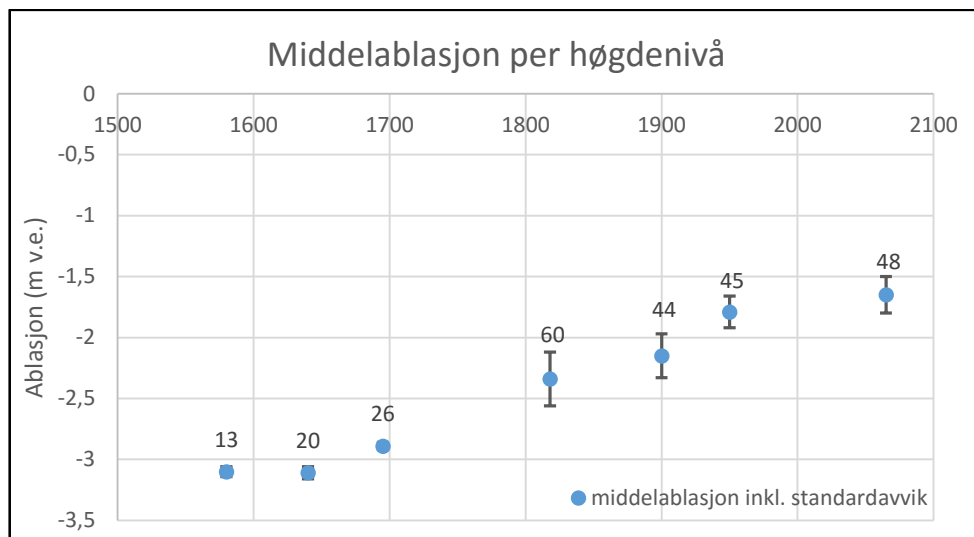
I nedre del av breen ved stake H20 er det fire stakar ved same høgdenivå (figur 5.21).

Ablasjonen der er ganske lik før den siste perioden 20. august -16. september. I løpet av denne perioden blir det ein skilnad på 0.15 m v.e. mellom staken med mest (H81) og minst (H20) smelting



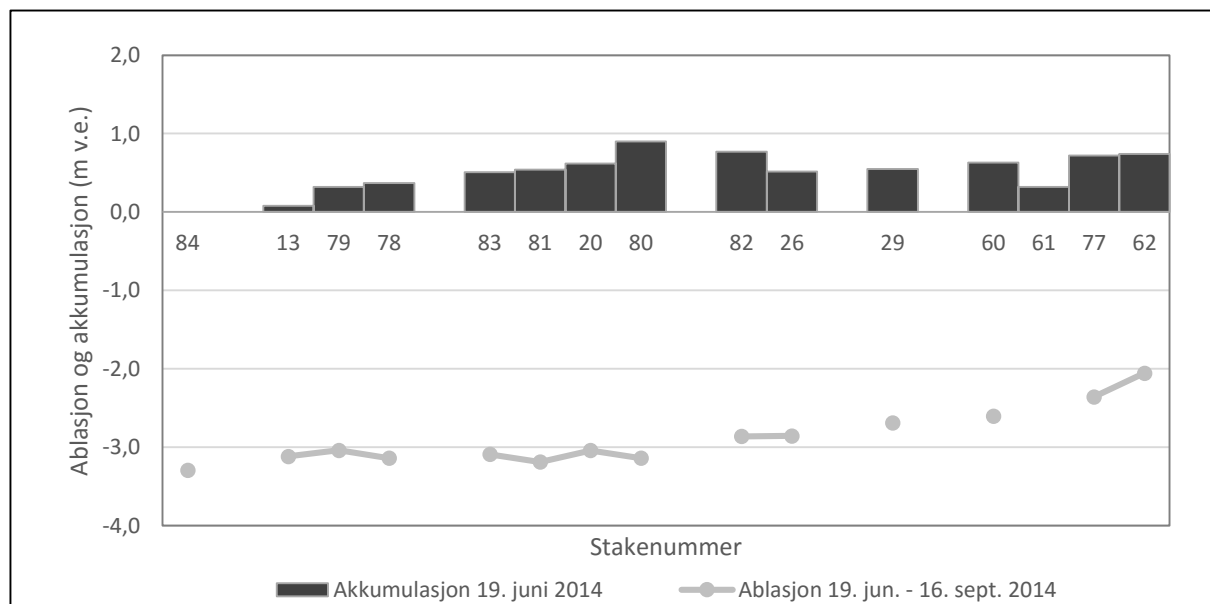
Figur 5.21: Temporær ablasjon ved samlede stakar, ablasjon frå 19. juni til 16. september 2014.

Stakane på same høgde i dei andre områda på bretunga ser ut til å vere jamne og endar opp med veldig like bs verdier i september. Standardavviket for stakar på same høgde er høvesvis 0,04, 0,05 og 0,03 for stakar på høgde med H13, H20 og H26 (figur 5.22). Vidare viser figur 5.21 at den største skilnaden i ablasjon på same høgdeintervall er ved stake H60 (om lag midt på breen). Denne skilnaden utviklar seg og blir større i løpet av smeltesesongen. Stake H62 har 0,57 m v.e. mindre smelting enn stake H60 i løpet av perioden 16. juli - 16. september. Totalt er det fire stakar i området og skilnaden mellom desse gir eit standardavvik på 0,24 (figur 5.22). Figur 5.22 viser at standardavviket blir større for stakar over 1800 m.o.h.



Figur 5.22: Middelablasjon for stakar ved same høgdenivå inkludert standardavviket for ablasjonen.

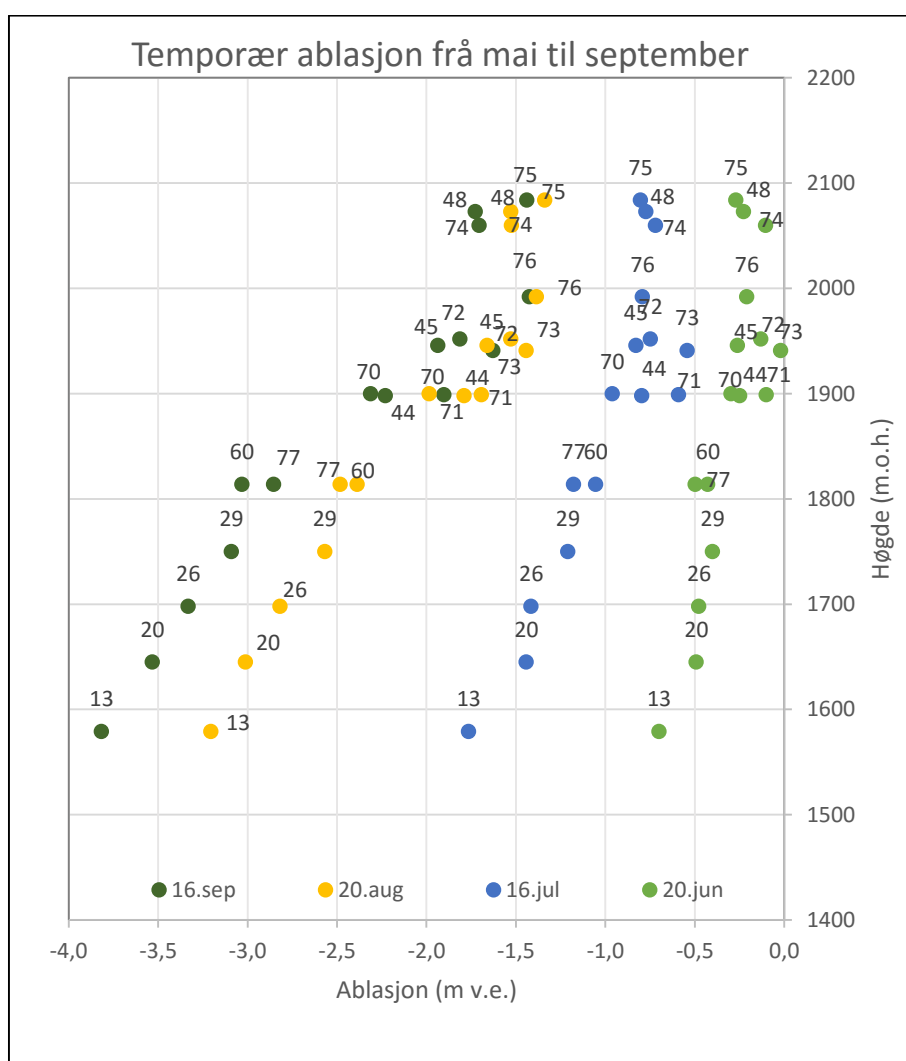
Figur 5.23 viser ablasjonen 19. juni – 16. september samanstilt med akkumulasjonen ved stakane 19. juni. For nokre stakar på same høgde er det skilnad i akkumulasjon. Stake H13 har rund 0.25 m v.e. mindre snø enn staken med mest snø. Stake H80 har 0.40 m v.e. meir snø enn staken med minst akkumulasjon, og for stakane ved H60 er det H61 som skil seg ut medan dei andre har ganske lik akkumulasjon. Det ser ikkje ut til å vere ein samanheng mellom skilnad i snømengde og ablasjon for stakar ved H60 og under (figur 5.23).



Figur 5.23: Akkumulasjon ved stakar under 1800 m.o.h. i juni 2014, og ablasjon frå juni til september på tilsvarende stakar. Stakane er sortert etter høgde. Stake H61 har ikkje ablasjonsdata fordi den falt ut.

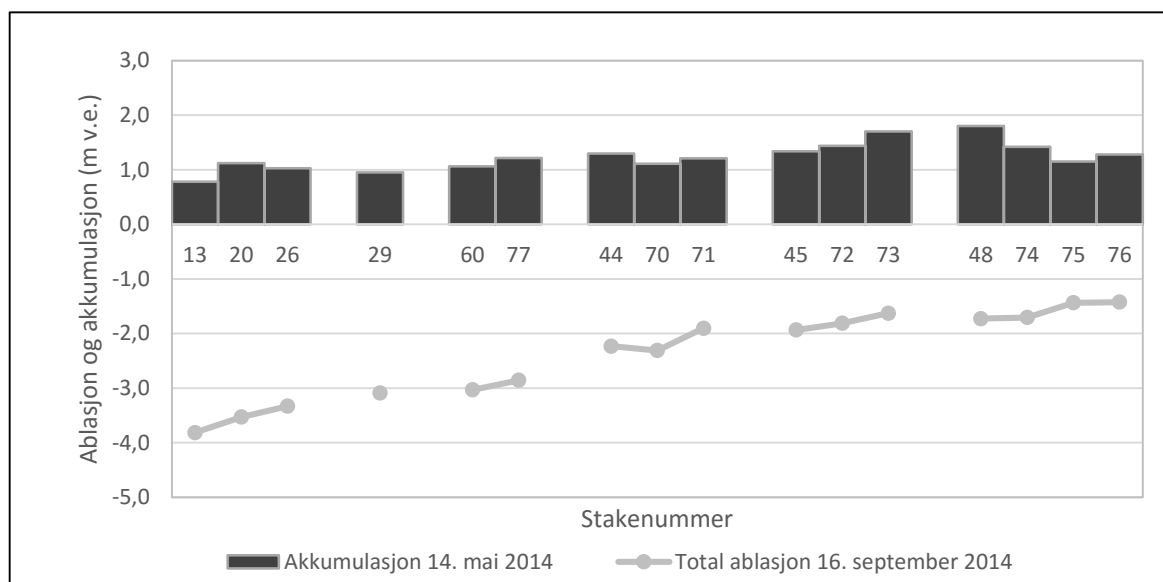
Figur 5.24 viser at ablasjonen ved stakane langs senterlinja av breen minkar lineært med høgda over havet. Vidare viser tydeleg skilnaden i ablasjon over 1800 m.o.h. Mot slutten av sesongen er avviket i ablasjon på høgde med stake H44 (senterlinje) størst i høve stake H71, som har 0,33 m v.e. mindre ablasjon. Standardavviket for dei tre stakane er 0,18 m v.e.

Stakane kring H45 gir omtrent det same resultatet som H44, der staken nærast botnen, H73, har lågare ablasjon og attverande snø i september. Når det gjeld botnane er ablasjonen i dei to sørlegaste områda svært like. Stakane i den nordlegaste botnen (H75 og H76) har gradvis lågare ablasjon i høve H74 og H48. Skilnadar i tilhøva her var at snøen smelta bort allereie i juni ved H74, medan dei to andre botnane hadde store mengder snø og firn.



Figur 5.24: Temporær ablasjon, fram til visse tidspunkt, på stakar med full massebalanse.

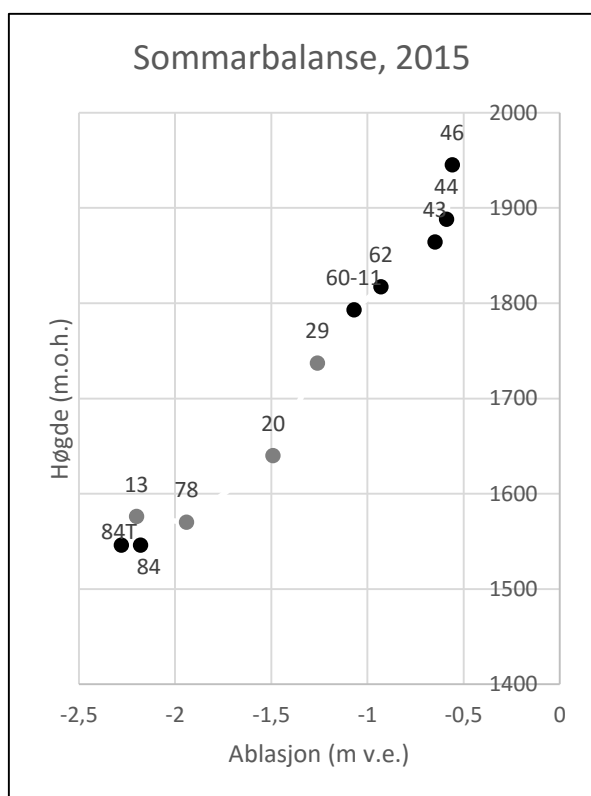
Figur 5.25 syner totalablasjon målt 16. september samanstilt med akkumulasjonsmåling 14. mai. Ved NVE-stake H44 er skilnaden størst til stake H70 som har 0,18 m v.e. mindre akkumulasjon. Litt høgare oppe på breen rundt 1945 m.o.h. (stake H45, H72, H73) er skilnaden større og H73 har ein akkumulasjon 0,36 m v.e. større enn H45. I botnane er også variasjonen stor frå 1,80 m v.e. ved H48 til 1,15 m v.e. ved H75.



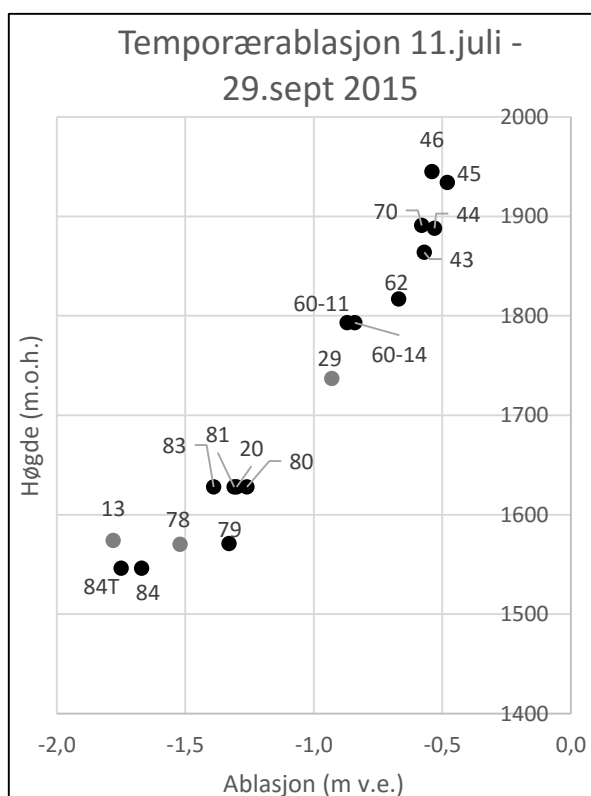
Figur 5.25: Akkumulasjon ved alle synlege stakar i mai 2014, inkludert total ablasjon målt 16. september 2014. Stakane er sortert etter høgde.

5.2.5 Temporær ablasjon 2015

Figur 5.27 viser kor mykje det smelta ved stakane mellom 11. juli og 29. september 2015, medan figur 5.26 viser sommarbalansen ved stakane målt i september. Mange av stakane frå 2014 var framleis snøa ned i juli og er difor ikkje med her. Stakane som er markert med lysare farge i figur 5.27 var veldig skeive i september og resultata er difor meir usikre. Stake H78 var 44° skeiv og H13 var nesten smelta ut. Rundt 1600 m.o.h. ved stakane plassert på same høgde som H20 er det spreiding i ablasjonen. Stake H83 har ein ablasjon på 0,13 m v.e. større enn ablasjonen ved H80 som har lågast ablasjon. H60-11 og H60-14 har svært lik ablasjon i denne perioden medan H62 som ligg litt høgare har 0,20 m v.e. mindre smelting. Stake H44 og H70 ligg ganske nær kvarandre i ablasjon med ein skilnad på 0,05 m v.e.

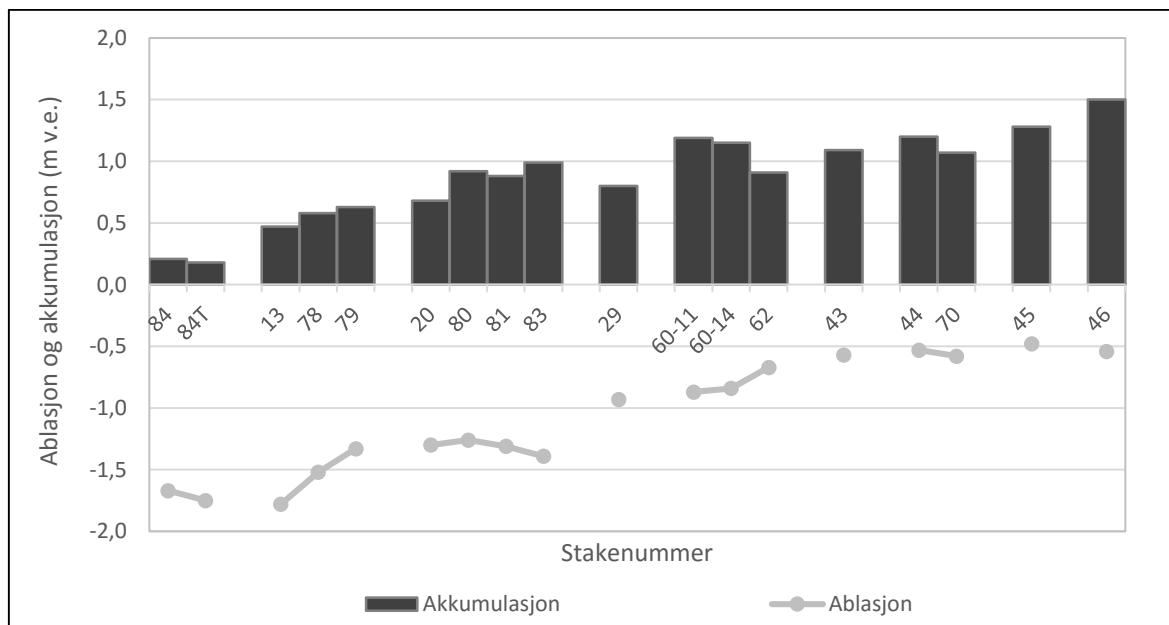


Figur 5.26: Totalablasjon ved stakane i 2015. Grå punkt er usikre og H20 var ikkje synleg i april og er rekna på bakgrunn av sondering.



Figur 5.27: Temporær ablasjon i perioden 11. juli til 29. september. Stakar markert med lysegrått har usikre verdier.

Det ser ikkje ut til å vere ein samanheng mellom skilnadar i snømengde i juli 2015 og skilnadar i ablasjon for stakar på same høgde (figur 5.28). Stake H62 har minst snø i starten av perioden, men lågast ablasjon av stakane på same høgde. Vidare har stake H83 størst ablasjon men også mest snø av stakane på denne høgda.



Figur 5.28: Akkumulasjon målt ved stakane 11. juli 2015, og totalablasjon målt 23. september 2015.

5.2.6 Massebalanse

Tettleik 2014

I løpet av smeltesesongen 2014 blei det gjort ti tettleiksmålingar. Resultatet er vist i tabell 5.5.

I august var snøen smelta bort ved alle stakane det hadde vore gjort tettleiksmålingar ved.

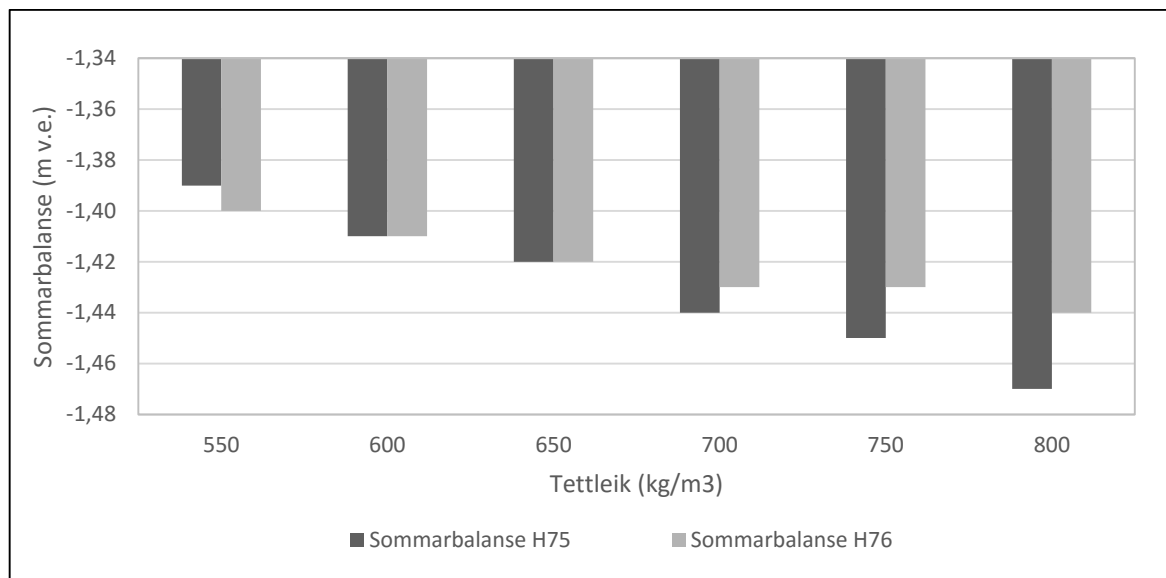
Stake H46 hadde 11 cm snø, men det meste av dette var nysnø og målinga var vanskeleg å utføre fordi snømengda var låg. Denne prøva er difor ikkje teken med i utrekningane, men ein tettleik på 0,6 blei brukt for attverandesnø etter erfaring frå NVE (Kjøllmoen et al., 2010).

Bruk av gjennomsnittleg tettleik og kumulativ vassekvivalent med snødjupet viste seg å gi svært like resultat. Ein forskjell på mellom 0 - 0,02 m v.e. i sommarbalanse blei funne ved bruk av dei to metodane. Likevel klarer den kumulative metoden med bruk av ein funksjon for vassverdien å fange opp islag og skilnadar nedover i snøpakka. Difor vart denne metoden føretrekt der snømengdene var om lag like store.

Tabell 5.5: Tettleiksmålingar i 2014.

Staker	Høgde (m.o.h.)	01.apr		19.jun		15.jul		21.aug	
		Tettleik (kg/m ³)	Total djup (m)	Tettleik (kg/m ³)	Total djup (m)	Tettleik (kg/m ³)	Total djup (m)	Tettleik (kg/m ³)	Total djup (m)
H13	1579	409	1,87	595	0,33	-	-	-	-
H44	1898	407	2,75	566	1,72	593	0,64	-	-
H46	1957	427	2,84	564	1,86	582	1,13	462*	0,12
H74	2060	-	-	-	-	563	0,98	-	-
* usikker måling på grunn av lite snø									

I den nordlegaste botnen, ved stake H75 og H76 smelta det firn. Tettleiken til firnen blei satt til 700 kg/m³ etter estimat av Andreassen (2003) på Hellstugubreen. For å finne ut kor stort utslag ulik tettleik hadde på sommarbalansen blei ein tettleik mellom 550 og 800 kg/m³ testa. Dette førte til ein variasjon i sommarbalanse mellom 1,39 m v.e. og 1,47 m v.e. ved H75 og 1,40 og 1,44 m v.e. ved H76. Figur 5.29 framstiller resultatet av sommarbalansen funne ved bruk av ulike tettleiksstørrelsar for firn.



Figur 5.29: Ulik tettleiksverdi for firn og påverknad på sommarbalansen.

Tettleik 2015

I 2015 blei det gjort tre tettleiksmålingar. Ein ved stake H46, 29. april, og to målingar 13. juli ved stake H46 og H60 (tabell 5.6). I juli var det 17 cm vatn i botnen av tettleiksgropa ved H60. Dette gjorde det vanskeleg å ta opp prøva og på grunn av usikkerheit i målinga blei ikkje resultatet ved H60 teke med i utrekningane. Ein funksjon for kumulativ vassekvivalent med snødjupet blei brukt, så lenge snømengdene tilsa det. Det blei ikkje målt tettleik på attverande snø og denne blei difor satt til 600 kg/m^3 etter måling på brear i nærleiken. Storbreen (1750 m.o.h.) viste ein tettleik på 584 kg/m^3 8. september 2015, medan Juvfonne viste ein tettleik på 598 kg/m^3 9. september 2015 (Andreassen, pers.komm.). Desse breane ligg høvesvis 15 og 12 km frå Hellstugubreen.

Tabell 5.6: Tettleiksmålingar i 2015.

Stake	Høgde (m.o.h.)	29. april		13. juli	
		Tettleik (kg/m^3)	Totaldjup (m)	Tettleik (kg/m^3)	Totaldjup (m)
H46	1945	440	345	548	241
H60	1793	-	-	606*	198
* Usikker på grunn av vanskar med å få opp prøva					

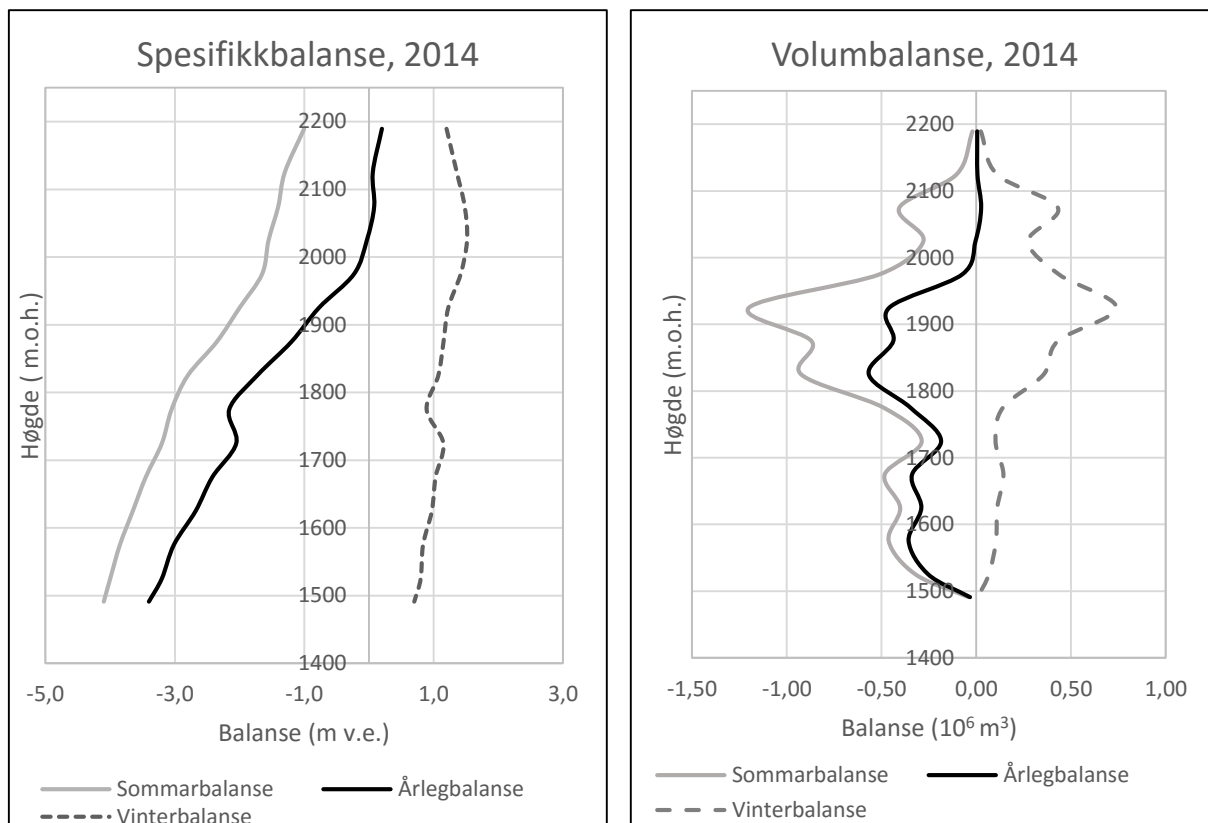
Massebalansen 2013 - 2014

Vinterbalansen blei i april 2014 rekna ut til 1,20 m v.e. Dette er 111% av normalen 1962-2013 og 107% av normalen 1971-2000. Sommarbalansen blei ved bruk av den manuelle metoden rekna ut til å vere -2,35 m v.e. Dette er 152% av middelveidien for perioden 1962-2013 og 160% av middelveidien for perioden 1971-2000. Årsbalansen dette året var negativ, -1,15 m v.e. Dette gir eit volumtap på -3,33 mill. m³ vatn. Resultatet med høgdefordeling per 50 m er vist i tabell 5.7 og diagram for spesifikk balanse og volum balanse er vist i figur 5.30.

Likevektslinja, ELA, ligg ut i frå utrekningane rett over 2000 m.o.h. (figur 5.30). Dette samsvarar nokolunde med observasjonane der snølinja i september låg i tilknytning til botnane, og blåisen var framme heilt opp til bandet 1960 m.o.h.

Tabell 5.7: Fordelinga av vinter, sommar og årleg balanse i 50 m høgdeintervall, massebalanseåret 2014.

Høgde (m.o.h.)	Areal (km ²)	Vinterbalanse		Sommarbalanse		Årlegbalanse	
		Spesifikk (m v.e.)	Volum (10 ⁶ m ³)	Spesifikk (m v.e.)	Volum (10 ⁶ m ³)	Spesifikk (m v.e.)	Volum (10 ⁶ m ³)
2150-2229	0,02	1,20	0,02	-1,00	-0,02	0,20	0,00
2100-2150	0,08	1,36	0,11	-1,30	-0,10	0,06	0,01
2050-2100	0,29	1,48	0,43	-1,40	-0,41	0,08	0,02
2000-2050	0,18	1,52	0,27	-1,55	-0,28	-0,03	-0,01
1950-2000	0,31	1,42	0,44	-1,65	-0,51	-0,23	-0,08
1900-1950	0,60	1,23	0,74	-2,00	-1,20	-0,77	-0,46
1850-1900	0,37	1,15	0,43	-2,35	-0,87	-1,20	-0,44
1800-1850	0,33	1,07	0,36	-2,80	-0,92	-1,73	-0,57
1750-1800	0,16	0,89	0,14	-3,05	-0,49	-2,16	-0,35
1700-1750	0,09	1,15	0,10	-3,20	-0,29	-2,05	-0,19
1650-1700	0,14	1,03	0,14	-3,45	-0,48	-2,42	-0,34
1600-1650	0,11	0,97	0,11	-3,65	-0,40	-2,68	-0,29
1550-1600	0,12	0,84	0,10	-3,85	-0,46	-3,01	-0,36
1500-1550	0,08	0,80	0,07	-4,00	-0,32	-3,20	-0,25
1482-1500	0,01	0,70	0,01	-4,10	-0,04	-3,40	-0,03
1482-2229	2,89	1,20	3,47	-2,35	-6,80	-1,15	-3,33



Figur 5.30: Massebalansediagram for spesifikk balanse (venstre) og volumbalanse (høgre) på Hellstugubreen i 2014.

Massebalansen 2014 - 2015

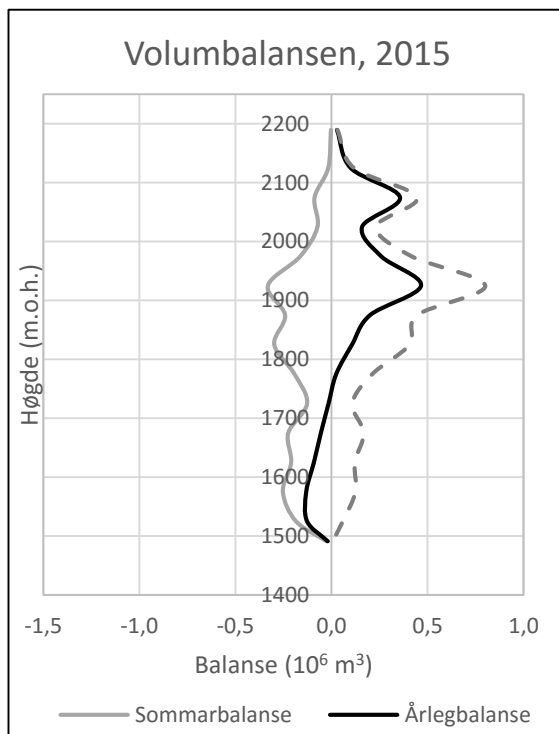
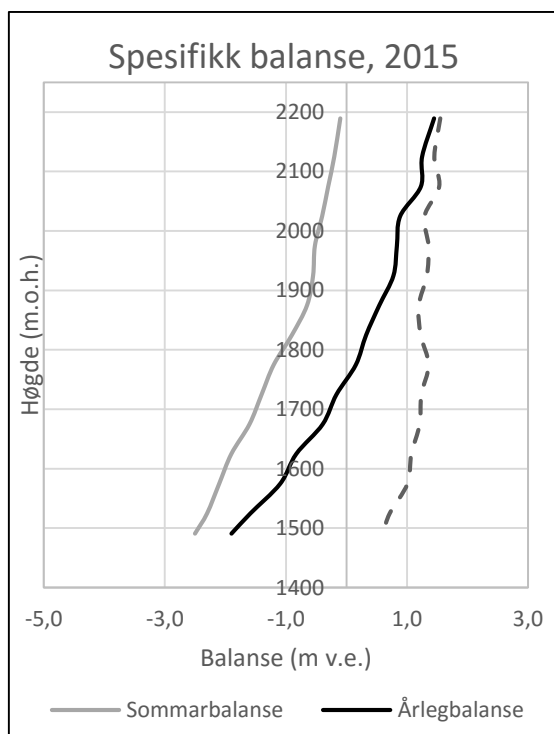
I 2015 blei vinterbalansen målt 29. april og ein Bw på 1,28 m v.e. funnet (tabell 5.8). Dette er 0,08 m v.e meir enn året før, og 119% av normalen 1962-2013 og 114% av normalen 1971-2000. Akkumulasjonsmålinga i 2015 viste tilleggsablasjon heilt opp til 1900 m.o.h. etter minimumsmåling i 2014. I dei nedre delane av breen smelta det opp til 30 cm ekstra. Normalt blir ablasjon etter minimumsmåling trekt frå på vinterbalansen det etterfølgjande året, fordi den kumulative årsbalansen skal bli korrekt. Dette blir ikkje tatt omsyn til i denne oppgåva fordi fokuset er på sommarbalansen og vinterakkumulasjon.

Sommarbalansen blei målt til -0,84 m v.e., med bruk av den manuelle metoden. Dette er 55% av middelverdien for normalperioden 1962-2013 og 57% av normalperioden 1971-2000. Tilsvarande liten sommarbalanse har ikkje vore målt sidan 1987 som hadde ein sommarbalanse på -0,76 m v.e. I 2014 smelta det 1,5 m v.e meir enn i 2015. I 2015 auka breen sin masse med 0,44 m v.e, noko som samsvarar med eit volum auke på 1,28 mill. m³ vatn.

I forhold til ELA ligg denne i følge utrekningane rundt 1760 m.o.h. i 2015 (figur 5.31). Dette er litt lågare enn den observerte snølinja ved ablasjonsmåling i september. Den låg rundt 1790 m.o.h. Ei så låg likevektslinje har ikkje blitt observert på Hellstugubreen sidan 1990, då låg ELA på 1630 m.o.h. Gjennomsnittleg ELA ved Hellstugubreen i perioden 1962 til 2003 ligg rundt 1909 m.o.h. (Andreassen et al., 2005).

Tabell 5.8: Fordelinga av vinter, sommar og årleg balanse i 50 m høgdeintervall, massebalanseåret 2015.

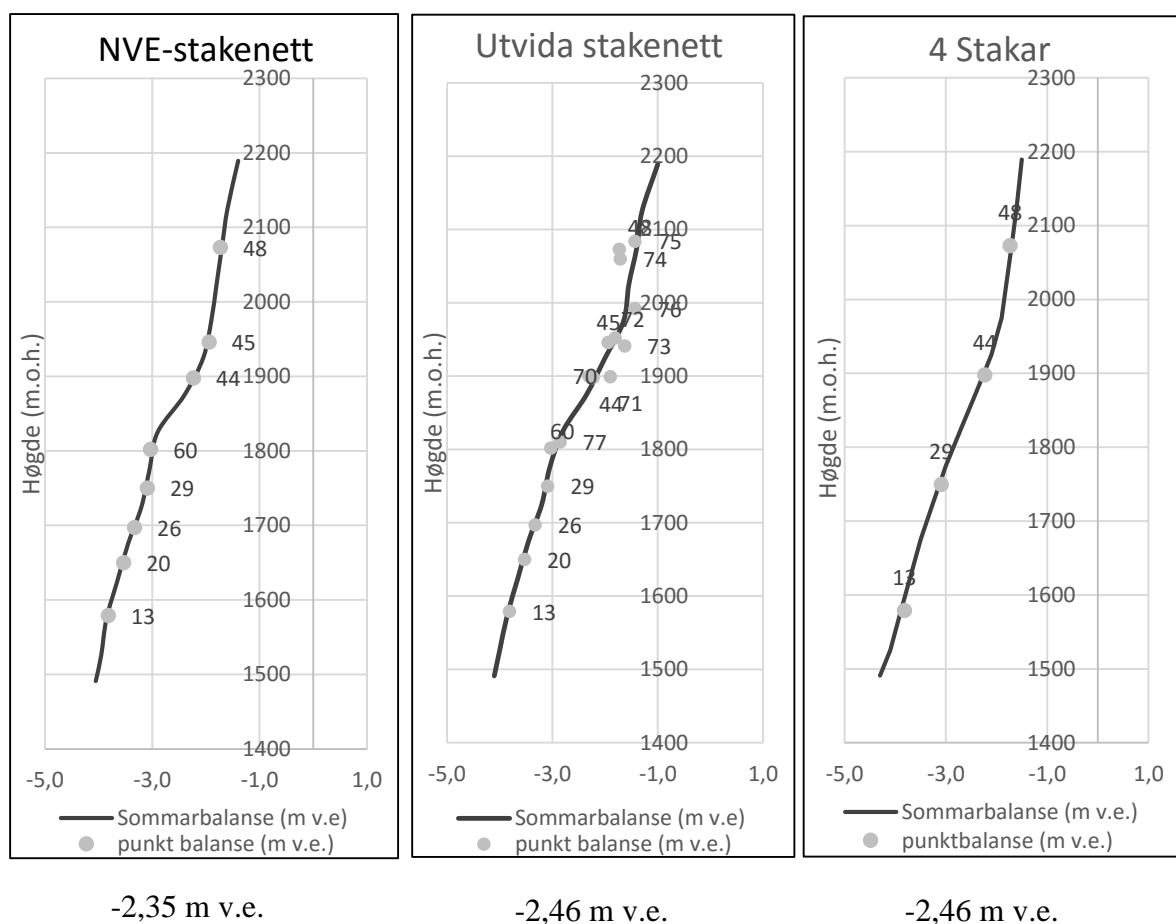
Høgde (m.o.h.)	Areal (km ²)	Vinterbalanse		Sommarbalanse		Årlegbalanse	
		Spesifikk (m v.e.)	Volum (10 ⁶ m ³)	Spesifikk (m v.e.)	Volum (10 ⁶ m ³)	Spesifikk (m v.e.)	Volum (10 ⁶ m ³)
2150-2229	0,02	1,55	0,03	-0,10	0,00	1,45	0,03
2100-2150	0,08	1,45	0,12	-0,20	-0,02	1,25	0,10
2050-2100	0,29	1,53	0,45	-0,30	-0,09	1,23	0,36
2000-2050	0,18	1,29	0,23	-0,40	-0,07	0,89	0,16
1950-2000	0,31	1,35	0,42	-0,52	-0,16	0,83	0,26
1900-1950	0,60	1,33	0,80	-0,55	-0,33	0,78	0,47
1850-1900	0,37	1,19	0,45	-0,65	-0,24	0,54	0,20
1800-1850	0,33	1,22	0,41	-0,90	-0,30	0,32	0,11
1750-1800	0,16	1,36	0,21	-1,20	-0,19	0,16	0,02
1700-1750	0,09	1,23	0,11	-1,40	-0,13	-0,17	-0,01
1650-1700	0,14	1,21	0,17	-1,60	-0,22	-0,39	-0,05
1600-1650	0,11	1,07	0,12	-1,90	-0,21	-0,83	-0,09
1550-1600	0,12	1,01	0,13	-2,10	-0,25	-1,09	-0,13
1500-1550	0,08	0,71	0,06	-2,30	-0,18	-1,59	-0,13
1482-1500	0,01	0,60	0,01	-2,50	-0,03	-1,90	-0,02
1482-2229	2,89	1,28	3,70	-0,84	-2,42	0,44	1,27



Figur 5.31: Massebalansediagram for spesifikk balanse (venstre) og volumbalanse (høgre) på Hellstugubreen i 2015.

5.3 Stakenettet sin påverknad på sommarbalansen

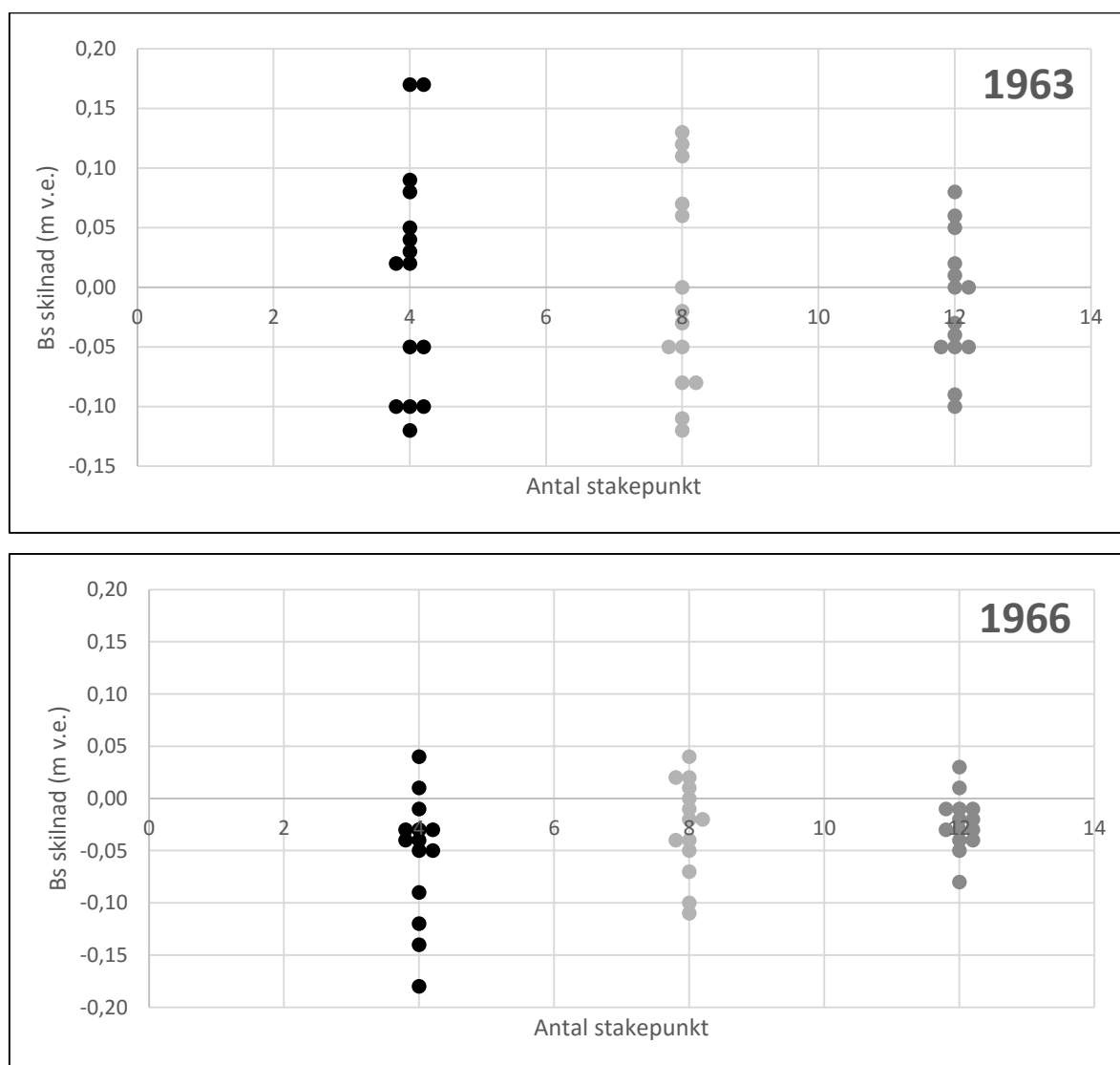
Stakenettet sin påverknad på sommarbalansen blei først og fremst testa ved å rekne sommarbalansen ved hjelp av det utvida stakenettet, og ved hjelp av det opphavlege stakenettet. Figur 5.32 viser resultatet av desse sommarbalansane, inkludert sommarbalansen rekna ved hjelp av fire stakar. Det utvida nettet gir 0,11 m v.e. meir ablasjon enn det opphavlege målenettverket.. Sommarbalansen rekna ved hjelp av fire stakar gav tilsvarende resultat som sommarbalansen rekna ved hjelp av det utvida stakenettet.

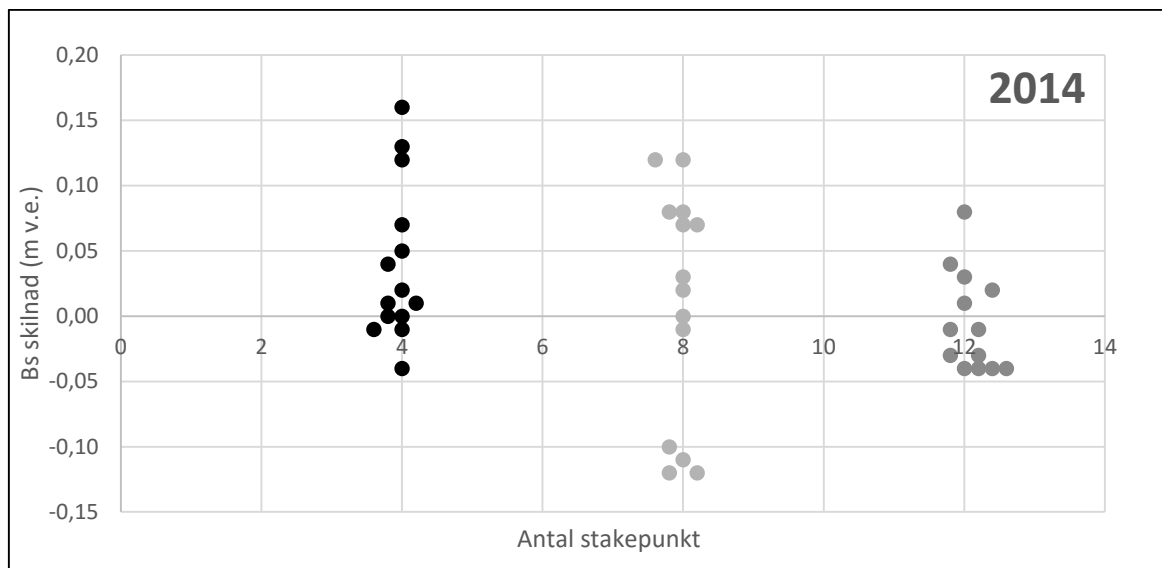


Figur 5.32: Sommarbalansen rekna ut ved bruk av det opphavlege stakenettet til NVE, det utvida stakenettet og fire stakar godt spreidd med høgda over havet.

5.3.1 Effekten av talet på stakar på Hellstugubreen

Figur 5.33 viser resultatet av skilnaden mellom sommarbalansen rekna på grunnlag av alle stakane og sommarbalansen rekna ved hjelp av fire, åtte og tolv stakar i 1963, 1966 og 2014. Stakane blei plukka ut frå fire soner med ulik høgde over havet (figur 4.8) . Resultatet viser at skilnaden til det opphavlege resultatet blir mindre til fleire stakar som var med i regresjonen. Likevel ser ikkje resultatet rekna med få stakar ut til å skilje seg så mykje frå resultatet ein får ved å bruke alle stakane (figur 5.33). Regresjon med fire stakar i 2014 gir opp i 0,16 m v.e. meir smelting enn resultatet ved bruk av alle stakane, men gjennomsnittleg er skilnaden 0,05 m v.e (tabell 5.9). Gjennomsnittsskilnaden frå $B_{S_{alle}}$ er større for åtte stakar enn for fire stakar (0,07), og ei samling med punkt rundt -0,10 skil seg ut frå resten av fordelinga. Middelveien for sommarbalansen rekna for fire, åtte og tolv stakar blei i 2014 høvesvis -2.41, -2.38 og -2.37 m v.e. Sistnemnde er same verdien som resultatet rekna med alle stakane. Middelveien for skilnad frå $B_{S_{alle}}$ varierer og går ikkje direkte ned med auka tal på stakar (tabell 5.9).





Figur 5.33: Skilnad mellom sommarbalanse rekna ut ved hjelp av alle stakane og sommarbalansen rekna ut ved hjelp av mindre stakenett, i 1963, 1966 og 2014. Spreiinga av punkta er lagt inn for å vise resultatet, talet på stakar som er blitt nytta er fire, åtte og tolv.

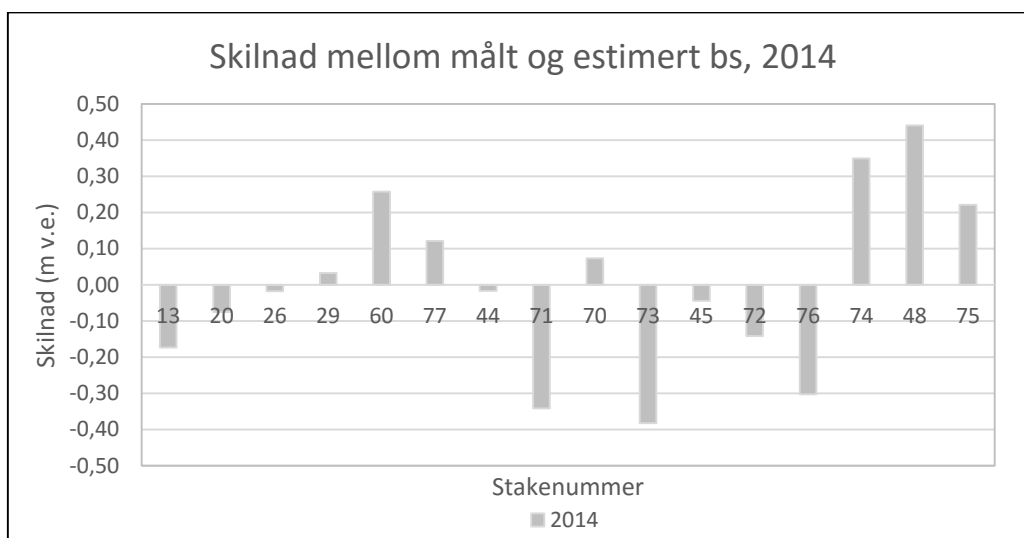
I 1963 er skilnaden frå Bs rekna ut med fire stakar og B_{salle} oppe i 0,17 m v.e (figur 5.33). Dersom åtte stakar blir brukt blir spreinga i skilnaden litt mindre. Skilnaden frå B_{salle} er større ved bruk av tolv stakar i 1963 enn i 2014. Likevel er middelerdien for Bs rekna med dei ulike kombinasjonane og mengdene stakar svært like B_{salle} i 1963, med høvesvis -1.89, -1.88 og -1.87 m v.e. for fire, åtte og tolv stakar (tabell 5.9). I 1966 er største skilnaden frå resultatet med bruk av fire stakar 0,18 m v.e. Middelerdien for alle utrekningane med fire stakar er 0,05 m v.e. mindre enn resultatet ein får ved regresjon med alle stakane. Denne verdien går jamt ned med bruk av fleire stakar dette året.

Gjennomsnittleg RMSE varierer ikkje så mykje og ligg jamt rundt 0,20 m v.e. alle åra. Det er heller ingen klar trend i RMSE med auka tal på stakar. I 1963 og 2014 er gjennomsnittleg RMSE litt mindre ved bruk av 12 stakar enn ved bruk av 4 stakar. I 1966 er gjennomsnittet likt for både fire, åtte og tolv stakar.

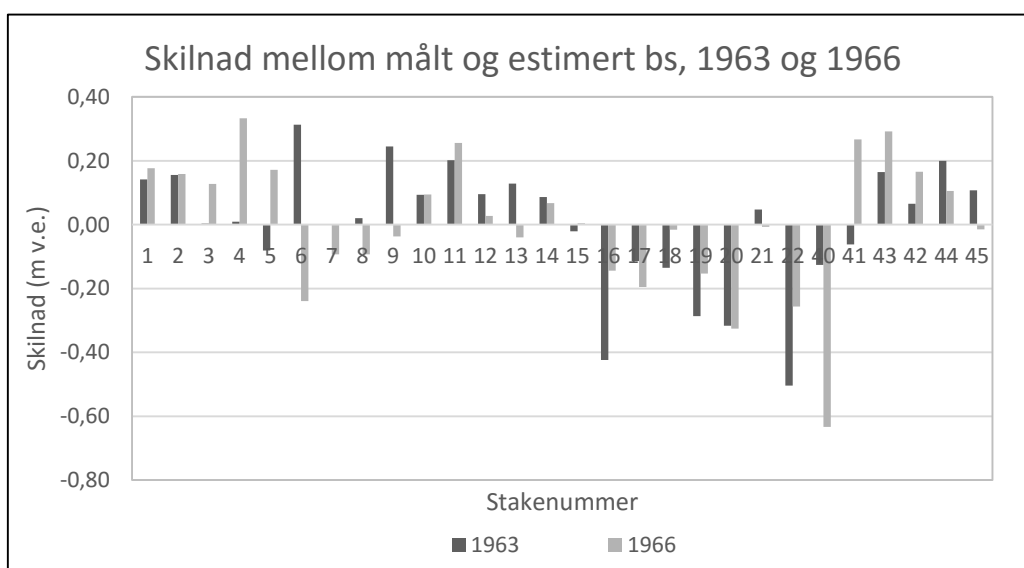
Tabell 5.9: Middelerdi for Bs rekna ut ved hjelp av ulike kombinasjonar av fire, åtte og tolv stakar, og middelerdi for skilnaden frå Bs rekna ut ved hjelp av alle stakane. Gjennomsnittleg RMSE for utrekningane er også vist. Alle verdier er i m v.e.

Staketall	2014		1963		1966	
	Middelerdi Bs	Middelerdi for skilnad frå B_{salle}	Middelerdi Bs	Middelerdi for skilnad frå B_{salle}	Middelerdi Bs	Middelerdi for skilnad frå B_{salle}
4	-2,41 ± 0,26	0,05	-1,89 ± 0,20	0,08	-1,55 ± 0,21	0,06
8	-2,38 ± 0,21	0,07	-1,88 ± 0,21	0,07	-1,57 ± 0,21	0,04
12	-2,37 ± 0,24	0,03	-1,87 ± 0,22	0,05	-1,58 ± 0,21	0,03
Bs alle	-2,37		-1,88		-1,60	

For å sjekke om nokre stakeplasseringar var betre enn andre til å estimere sommarbalansen blei skilnaden mellom den målte verdien og den lineære-regresjonsverdien rekna ut. I 2014 hadde stakane i botnane, og lateralt i nærleiken av botnane, generelt eit større avvik enn dei andre stakane (figur 5.34). I 1963 og 1966 er det ikkje nokon samanheng mellom store og små avvik og plasseringar av stakar. Det er heller ikkje samanheng mellom desse åra (figur 5.35). Det blei ikkje gjort målingar i botnane desse åra, men mange laterale målingar spreidd over resten av breoverflata (figur 5.35).



Figur 5.34: Skilnad mellom målt og estimert sommarbalanse ved dei enkelte stakane i 2014. Stakane er sortert med stigande høgde.



Figur 5.35: Skilnad mellom målt og estimert sommarbalanse ved dei enkelte stakane i 1963 og 1966. Stakane er sortert med stigande høgde.

5.4 Usikkerheit og feilkjelder

5.4.1 Bruk av ulike metodar for utrekning av sommarbalansen

Ablasjonsgradient metoden

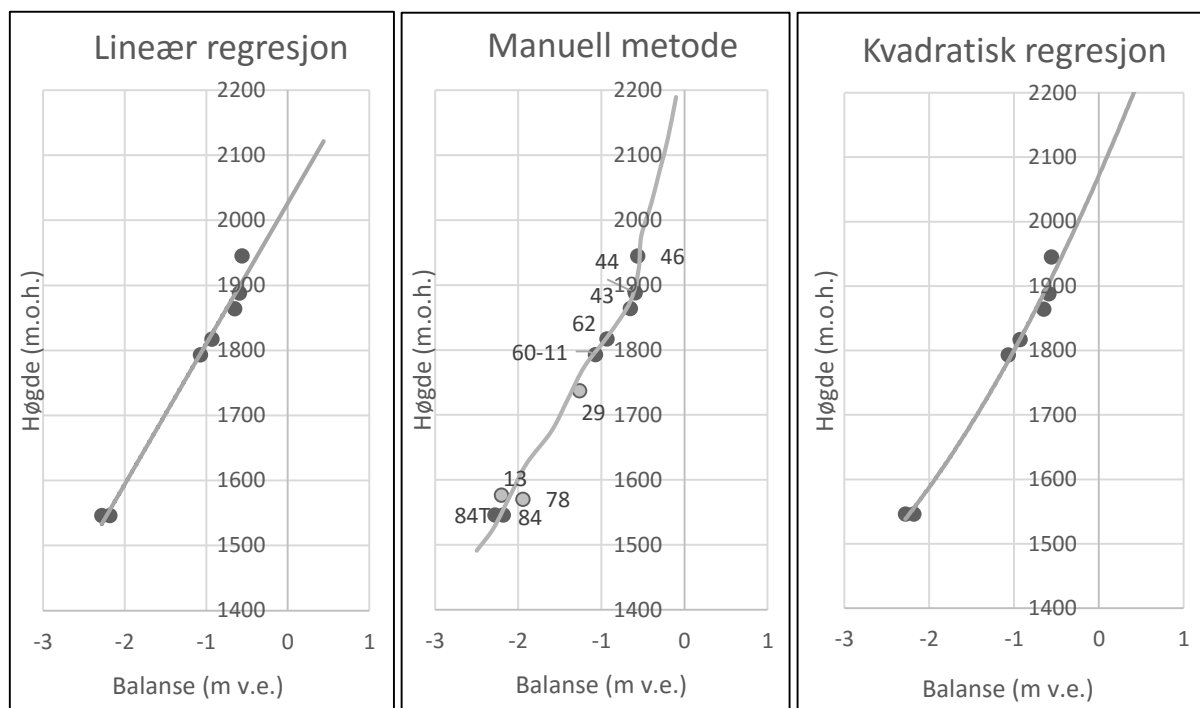
I 2014 er det liten skilnad mellom sommarbalansen rekna ut med ulike ablasjonsgradientar, både med bruk av det utvida stakenettet og NVE-stakenettet (tabell 5.10). Lineær regresjon gir 0.03 m v.e. meir smelting enn kvadratisk regresjon for det utvida nettet, og den manuelle metoden ligg midt mellom. Ved bruk av NVE-stakenettet gir lineær og kvadratisk metode det same resultatet medan manuell metode gir 0.01 m v.e. mindre smelting. Tabell 5.11 gir oversikt over regresjonsmetodane, korrelasjonen r^2 og ablasjonsgradientane dei ga ut frå likningane. Korrelasjonen er stabilt høg ved bruk av begge regresjonstypene både i 2014 og 2015. Figur 5.36 viser resultatet av ablasjonsgradientane funne ved dei ulike metodane i 2015. Dette året vart skilnaden mellom regresjonsmetodane og den manuelle metoden mykje større enn i 2014, opp i 0.14 m v.e. Dette året hadde ikkje stakenettet god nok romleg fordeling verken til å teste eit utvida stakenett eller kriging.

Tabell 5.10: Sommarbalansen i 2014 rekna ut ved hjelp av det utvida stakenettet og det opphavlege NVE-stakenettet. I tillegg er resultat frå ulike metodar vist både for 2014 og 2015.

År	Utvida stakenett						NVE stakenett		
	Romleg metode			Ablasjonsgradient			Ablasjonsgradient		
	Ordinær kriging	CoKriging	EBK	Lineær	Kvadratisk	Manuell	Lineær	Kvadratisk	Manuell
2014	-2,36	-2,35	-2,36	-2,37	-2,34	-2,35	-2,47	-2,47	-2,46
2015	-	-	-	-	-	-	-0,70	-0,74	-0,84

Tabell 5.11: Lineær regresjon og kvadratisk regresjon med likning og r^2 . Data er vist for NVE-stakenett og utvida stakenett i 2014, og NVE-stakenett i 2015. y er spesifikk sommarbalanse (m v.e.) ved høgda x (m).

År	Regresjonsmetode	NVE-stakenett		Utvida stakenett	
		Likning	r^2	Likning	r^2
2014	Lineær	$y = 0,00477x - 11,418$	0,97	$y = 0,00547x - 12,6389$	0,92
	Kvadratisk	$y = -1e^{-5}x^2 + 0,0081x - 14,281$	0,97	$y = -3e^{-5}x^2 + 0,0158x - 21,689$	0,92
2015	Lineær	$y = 0,00463x - 9,3775$	0,98	-	-
	Kvadratisk	$y = -4e^{-5}x^2 + 0,0191x - 21,708$	0,99	-	-

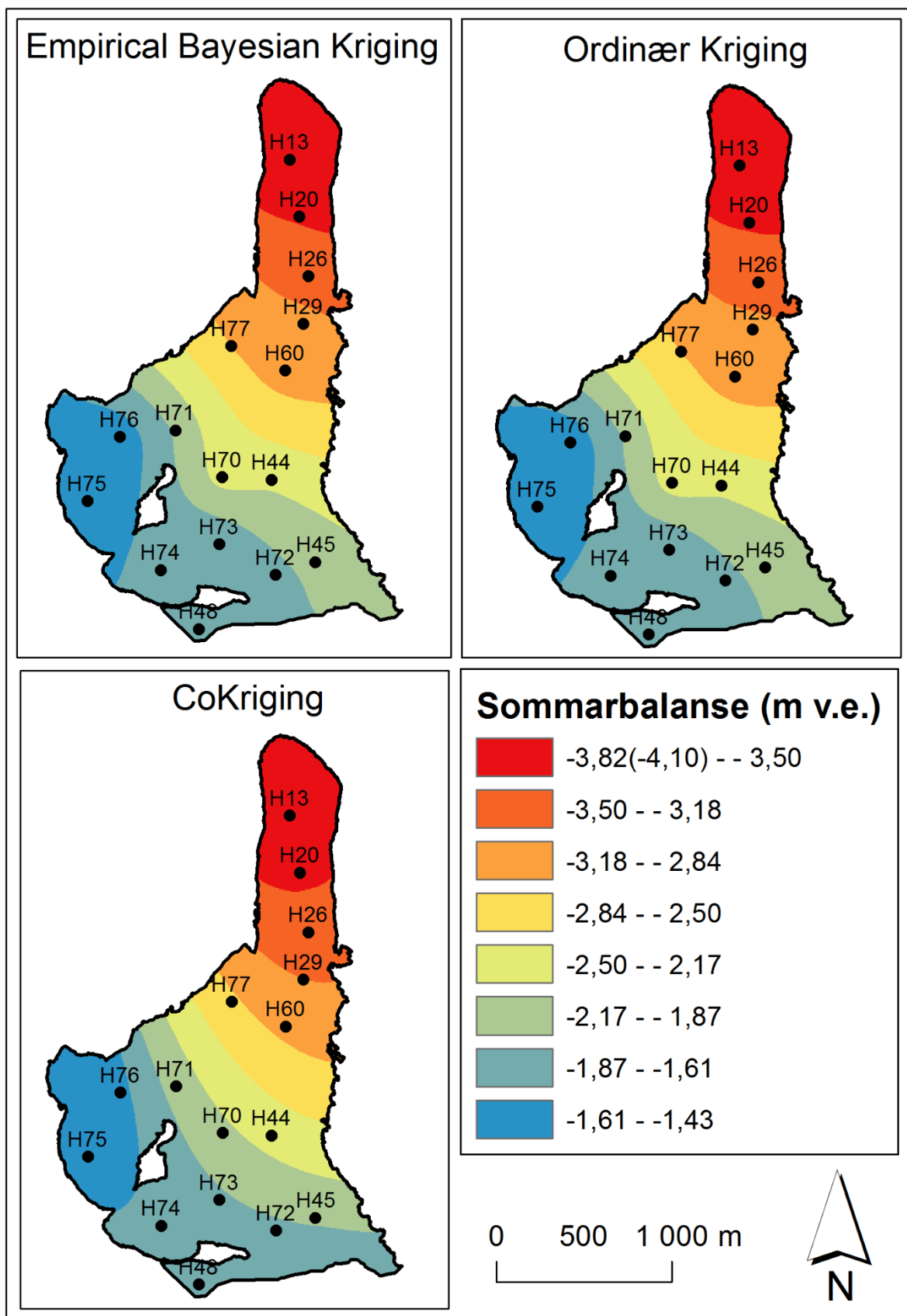


Figur 5.36: Sommarbalansen rekna ut ved lineær regresjon , manuell metode og kvadratisk regresjon.

Romleg metode

Bruk av ulike former for kriging for å interpolere og ekstrapolere sommarbalansen over heile breoverflata gir svært like sommarbalansar. Cokriging gir 0,01 m v.e. mindre smelting enn dei to andre, fordelinga av ablasjonen er også svært lik for EBK og ordinær kriging medan cokriginga skil seg meir ut (figur 5.37). Cokriging gir også meir ablasjon ved Bretunga og har verdiar opp i 4,10 m v.e, medan dei andre metodane har -3,82 m v.e. som høgaste ablasjonsfaktor.

Når det gjeld sommarbalansen funne ved hjelp av den romlege metode i forhold til ablasjonsgradient metodane er skilnaden også veldig liten med verdiar mellom 0,01 og 0,02 m v.e (tabell 5.10).



Figur 5.37: Sommarbalansen interpolert og ekstrapolert over breoverflata ved hjelp av empirical bayesian kriging (EBK), ordinær kriging og cokriging.

5.4.2 Effekten av skeive stakar

Måling av stakevinkel og utrekninga av reell lengde på skeive stakar viser at vinklar heilt opp i 20° ikkje har stor påverknad på total ablasjon i løpet av ein ablasjonssesong (tabell 5.12). Vinkelen på stakane som var skeive i starten av smeltesesongen 2014 og utviklinga dei hadde er vist i tabell 5.12.

I september var det berre stake H46 som framleis var skeiv. Dette førte til ei registrert smelting ved staken som var 0,05 m v.e. større enn om staken hadde vore rett heile sesongen. Tabellen viser at dersom stakane er litt skeive i korte periodar påverkar dette ablasjonen med 0,02 - 0,03 m v.e. Stake H26 er den staken som registrerar det største avviket i løpet av sesongen. Den var rundt 16-20° skeiv i tre månadar og viser totalt 0,10 m v.e. større smelting enn ein rett stake ville gjort. Figur 5.38 viser eit døme på ein stake som vart skeiv fordi ein smeltevasskanal tilfeldigvis gjekk like ved.



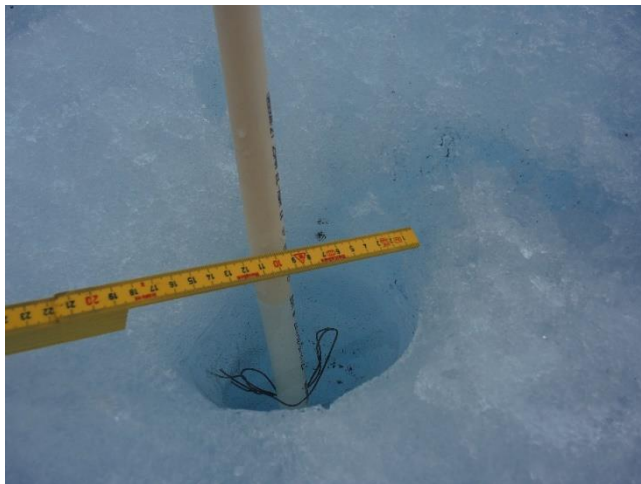
Figur 5.38: Bilete stake H79. Tatt 20. august 2014 (bilete: Oda J. Røyset).

Tabell 5.12: Stakevinkel målt på stakane, utrekna lengde ved bruk av trigonometri og skilnad i smelting på ein skeiv kontra rett stake. Alle data er frå 2014.

Stake nr	Smelte-periode	Stakevinkel (°)	Målt Stakelengd (m)	Utrekna lengd (m)	Skilnad stakelengd (m)	Skilnad smelting (m)	Skilnad smelting (m v.e)
13	Mai	10	2,24	2,21	0,03		
	Juni	10	4,00	3,94	0,06	-0,03	-0,02
20	Mai	20	1,15	1,08	0,07		
	Juni	7	2,83	2,81	0,02	0,05	-0,03
26	Mai	20	0,43	0,40	0,03		
	Juni	18	2,09	1,99	0,10	-0,07	
	Juli	16	3,49	3,35	0,14	-0,04	-0,10
29	Mai	7	0,46	0,46	0,00		
	Juni	7	1,86	1,85	0,01	-0,01	
	Juli	6	3,07	3,05	0,02	-0,01	-0,02
44	Mai	8	1,56	1,54	0,02		
	Juni	8	2,86	2,83	0,03	-0,01	
	Juli	8	3,87	3,83	0,04	-0,01	-0,01
48	Mai	20	0,39	0,37	0,02		
	Juni	22	1,94	1,8	0,14	-0,12	
	Juli	17	2,96	2,83	0,13	0,01	-0,06
46	Juni	14	0,77	0,75	0,02		
	Juli	12	1,76	1,72	0,04	-0,02	
	aug	12	2,98	2,92	0,06	-0,02	
	sept	12	3,40	3,33	0,07	-0,01	-0,05

5.4.3 Bruk av ulike typar stakar

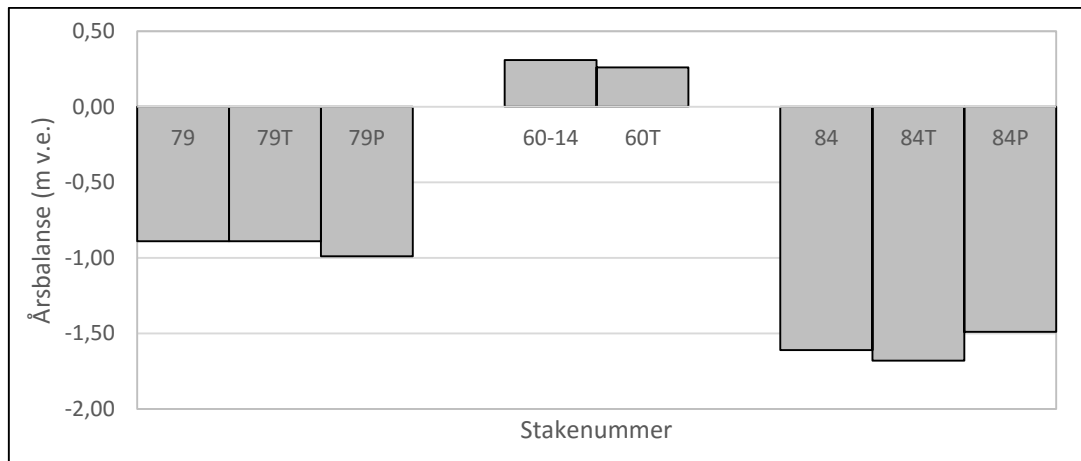
I september 2014 blei det satt ut PVC-stakar ved H84, H13 og H60. På grunn av mykje snø og ein smeltesesong som kom seint i gong i 2015 var ingen av PVC-stakane synlege under feltarbeidet 10. - 14. juli 2015. Under neste vitjing ved minimumsmåling i september var PVC-staken, H84-P, nesten smelta ut. Denne blir difor rekna som usikker, men er likevel teken med i figur 5.40. Den høgaste plasseringa av stakeprosjektet var ved H60. Her var det framleis snø i september og dermed ingen PVC-stakar synlege.



Figur 5.39: Smeltehol kring stake H84P i september 2015 (bilete: Oda J. Røyset).

Figur 5.40 viser årsbalansen, ba, for stakeprosjekta ved H84, H79 og H60. Stakeprosjektet ved H84 viser ein skilnad på 0,07 m v.e. meir smelting ved stake H84T med trepropp enn den vanlege aluminiumsstaken. Ved stake H79 er ablasjonen heilt lik mellom staken med trepropp og aluminiumsstaken, medan PVC-staken 79P viser 0,10 m meir smelting. Skilnaden mellom H60-14 og H60T er 0,05 m der staken med trepropp viser mest smelting.

Undersøking av tilhøva ved dei ulike staketypane viste seg å vere like i forhold til danning av smelteholer. H84-P hadde eit smeltehol på rundt 18 cm i diameter (figur 5.39). Dei andre PVC stakane som var synlege hadde også smelteholer men diameteren blei ikkje målt. Det var berre H84P som var skeiv av dei fire PVC-stakane som var synlege i september (H84P, H79P, H79P-15, 29P).



Figur 5.40: Årsbalansen, ba, målt same stad ved hjelp av PVC stake (P), aluminiumsstake med trepropp (T) og vanleg aluminiumsstake.

6 Diskusjon

6.1 Årleg massebalanse 2014 og 2015

Den årlege massebalansen i 2014 og 2015 er vidt forskjellige. 2014 var eit år med ein negativ årsbalanse på -1,15 m v.e., medan 2015 hadde ein positiv årsbalanse på 0,44 m v.e. Dette gir ein skilnad på 1,59 m v.e. Eit så stort overskot som Hellstugubreen hadde i 2015 har ikkje breen hatt sidan 1989 og 1990. Skilnaden i sommarbalanse er mykje større enn skilnaden i vinterbalanse dei to åra. I 2014 var ablasjonen nesten tre gongar så stor som i 2015. Dette skuldast først og fremst sommartemperaturen. I smeltesesongen 2014 (1.mai - 30.sept) var det 1°C varmare enn gjennomsnittet i perioden 2000-2013 ved Juvasshøe. I 2015 var det 1,3°C kaldare enn denne perioden.

Data frå vêrstasjonar i nærleiken av Hellstugubreen viser at det både i 2014 og 2015 kom meir nedbør enn normalen 1961-1990. Spesielt kom det mykje nedbør ved stasjonen i Sogndal der det i 2015 kom 51% meir enn normalen 1961-1990. I 2014 kom det berre 16% meir enn den same normalen. Bøverdalen viser også skilnad i nedbør dei to åra, med meir i 2015 enn i 2014, men skilnaden er ikkje like stor. Forskjellen i nedbør ved stasjonane viser ikkje så godt i vinterbalansen som var 109% av normalen 1961-2012 i 2014, og 118% av denne normalen i 2015. Totalt hadde 2015 ein vinterbalanse 0,08 m v.e. større enn 2014. Denne vesle skilnaden viser at det er sommarbalansen som er avgjerande for skilnaden i årsbalansen dei to åra.

Temperaturdata frå Juvasshøe tyder på at smeltesesongen starta mykje seinare i 2015 enn i 2014. Før smeltinga på ein bre kan byrje må heile snølaget varmest opp til 0°C (Hock, 2005). Lufttemperaturen kan ikkje fortelje når dette skjer, men den kan gi ein indikasjon på når oppvarminga startar. Det har vist seg å vere ein høg korrelasjon mellom lufttemperatur og smelting. Dette gjer at temperatur, som regel i form av positive graddagar, kan brukast til å modellere smelting (Braithwaite et al., 1998). Sjølv om metoden har sine svakheiter, som til dømes ikkje å ta omsyn til topografiske effektar (Hock, 2003).

Kumulative positive graddagar frå Juvasshøe viser at ablasjonssesongen starta rundt 18. mai i 2014. Då fekk graddagskurva ein bratt gradient og temperaturar godt over 0°C blei målt ved vêrstasjonen (figur 5.6). I 2015 skjedde ikkje dette før rundt 16. juni, ein månad seinare enn i 2014. Totalt hadde balanseåret 2014 rundt 253 positive graddagar meir enn 2015, målt ved Juvasshøe vêrstasjon. Den seine starten på ablasjonen i 2015 førte til at snøen blei liggjande

lenger, noko som ga kortare periode med eksponering av breis og derfor ei lenger periode med høg albedo. Resultatet blei låg sommarbalanse og ein årsbalanse med overskot.

Tabell 6.1 viser positive graddagar (PDD) på Hellstugubreen ved ulike høgder i 2014 og 2015, rekna ut ved hjelp av Juvasshøe vêrstasjon. I tillegg er graddagsfaktoren (DDF) rekna ut både for heile perioden (DDF_{total}) og for periodar med snø og is ($DDF_{snø}$ og DDF_{is}). Generelt smeltar det mindre per positiv graddag i 2015 enn i 2014, og graddagsfaktoren blir lågare med høgda. Det har samanheng med at andre faktorar enn temperatur har påverknad på ablasjonen. Første del av smeltesesongen 2015 var prega av låge temperaturar og nedbør i form av snø, til og med juli hadde slika dagar. Dette tyder på at akkumulasjonen har vore større enn det som blei målt 29. april, spesielt i dei øvre delane av breen. Det fører også til at vinterbalansen eigentleg var litt større, og at det har smelta litt meir enn målt. Uansett må desse sommarsnøfalla ha gitt mykje høgare albedo i dei øvre delane av breen, og bremsa smeltinga slik at graddagsfaktoren blei lågare (Hock, 2005).

Tabell 6.1: Positive graddagar (PDD) og positiv graddagsfaktor (DDF), rekna ut ved ulik høgde i 2014 og 2015. PDD er rekna frå Juvasshøe vêrstasjon. DDF_{total} er gjennomsnittleg graddagsfaktor i løpet av den målte smelteperioda, $DDF_{snø}$ er graddagsfaktor for snø og DDF_{is} graddagsfaktor for is.

År	Stake (nr)	Høgde (m.o.h.)	PDD	Ablasjon (m v.e.)	DDF_{total} (mm d-1 °C-1)	$DDF_{snø}$ (mm d-1 °C-1)	DDF_{is} (mm d-1 °C-1)
2014	H13	1579	868	3,82	4,4	3,3	4,8
2014	H60	1802	667	3,03	4,5	3,6	5,3
2014	H44	1898	583	2,23	3,8	3,2	4,6
2015	H84	1544	588	2,18	3,7	2,7	4,2
2015	H60	1806	387	1,07	2,8	2,8	-
2015	H44	1888	331	0,59	1,8	1,8	-

I 2014 smelta det opp til to mm meir per positive graddag enn det gjorde i 2015, dersom ein ser på DDF_{total} (tabell 6.1). Graddagsfaktoren auka også litt med høgda over havet frå H13 til H60, både totalt, for snø og for is (tabell 6.1). I følgje Hock (2003) kan ein forvente at graddagsfaktoren aukar med høgda over havet, med auka direkte innstråling og med lågare albedo, dersom tilhøva elles er like. Dette forklarar dermed den høgare graddagsfaktoren ved H60. Den ligg høgare enn H13 og har meir direkte innstråling. I tillegg forsvann snøen fort både ved H13 og H60 noko som ga tidleg låg albedo begge stadar. I 2014 var det også eit sommarsnøfall som ga rundt 24 cm nysnø i akkumulasjonsområdet. Dette førte til bremsa smelting mot slutten av smeltesesongen, og lågare graddagsfaktor. Utan denne snøen hadde totalablasjonen vore endå større dette året.

I 2014 blei graddagsfaktoren i tillegg rekna ut ved hjelp av AVS på Hellstugubreen (tabell 6.2). Når desse temperaturdata blei nytta blei talet på positive graddagar lågare og graddagsfaktoren høgare. Dette fortel at det eigentleg smelta endå meir per positive graddag i 2014. Skilnaden ved bruk av dei ulike stasjonane kjem av at temperaturen på Hellstugubreen var lågare enn ved Juvasshøe over fleire periodar. Dette kjem tydeleg fram ved grafisk samanlikning av H44 og Juvasshøe (Figur 5.1). Stasjonane ligg på om lag same høgde, høvesvis 1894 og 1898 m.o.h, og kan dermed samanliknast direkte. Spesielt i dei varmaste periodane i juli, er det stor skilnad i temperatur målt ved H44 og Juvasshøe.

Temperaturforskjellen kan kome av at Juvasshøe vêrstasjonen står på fjell og blir påverka av oppvarma stein i området rundt.

Tabell 6.2: Positive graddagar (PDD) og positiv graddagsfaktor (DDF) i 2014, rekna ut ved hjelp av AVS på Hellstugubreen (plassert ved H44 og H13). H60 er rekna ved hjelp av H44.

År	Stake (nr)	Høgde (m.o.h.)	PDD	Ablasjon (m v.e.)	DDF _{total} (mm d-1 °C-1)	DDF _{snø} (mm d-1 °C-1)	DDF _{is} (mm d-1 °C-1)
2014	H13	1579	758	3,82	5,0	3,9	5,3
2014	H60	1802	529	3,03	5,7	4,6	6,5
2014	H44	1898	449	2,23	5,0	4,7	5,8

Forholda var på mange måtar omvendt i 2014 enn i 2015. Snølinja trakk seg fort tilbake i 2014, og ga tidleg eksponering av breis og lågare albedo. Dette resulterte i ein negativ sommarbalanse og ein negativ årsbalanse, sjølv om akkumulasjonen var større enn normalen dette året også. Utrekningane viser at det er ein klar samanheng mellom ablasjon og graddagsfaktor, og at lufttemperaturen hadde stor påverknad. Den store skilnaden i årleg balanse på 1,6 m v.e. skuldast hovudsakleg skilnadar i ablasjonstilhøva. Det er også med på å vise at sommarbalansen er den dominerande parameteren for massebalansen på Hellstugubreen (Andreassen et al., 2005).

6.2 Ablasjonsmønster

Analyse av temporær ablasjon på Hellstugubreen i 2014 og 2015 viser at ablasjonen på bretunga (1500-1800 m.o.h.) er svært lik for stakar ved same høgde. Høgare oppe nærare akkumulasjonssona blir skilnaden større. Hannah et al. (2000) finn at mikroklima, høgde over havet og temporær snøgrense primært kontrollerer energifordelinga og i så måte også ablasjonsmønsteret. Dette på Taillon, ein botnbre i dei franske Pyreneeane. Mikroklima er avhengig av faktorar som himmelretning, helling, albedo og overflateruheit som avgjer kor

mykje nettostråling overflata sit igjen med (Littmann, 2008). Difor vil ablasjon på stakar ved same høgde bli samanlikna, og eventuelle skilnadar diskutert i høve globalstråling, snømengde, snølinje, og albedo. Balanseåret 2015 har ikkje så mange målepunkt og måleperiodar, og i tillegg er usikkerheita ved H13 og H78 for stor til at dei kan nyttast. Difor vil 2014 resultatet i hovudsak bli brukt.

Ablasjonen på bretunga er generelt lik for stakar på same høgde i 2014 og minkar lineært med høgda over havet. Dette heng mellom anna saman med at strålingsforholda er likt fordelt på denne delen av breen. Vidare ser snølinja ut til å flytte seg jamt oppover. Bretunga er forholdsvis smal (rundt 0,43 km), dette er med på å gjere forholda i høve skygge og sol like. Mot slutten av smeltesesongen blir skilnaden i ablasjon litt større for stakane ved H13 og H20. Dette ser ut til å kome av skilnadar i albedo. Ei mørk isoverflate med brestøv har lågare albedo enn til dømes kvit pjalteris (Cuffey og Paterson, 2010). Dette fører til at overflater med låg albedo vil få ein høgare nettostråling og dermed meir energi til smelting. Det stemmer overeins med albedo og ablasjonsmålingane i september 2014. Stake H83 har ein totalablasjon på 0,10 m v.e. mindre enn H81 og ein albedo på 0,42, medan H81 har ein albedo på 0,20 (tabell 6.3). Det same gjeld for stakane ved H13 der staken med høgast albedo også har lågast ablasjon. Likevel er dette små skilnadar og laterale målingar verkar overflødig i dette området.

Frå 1800 m.o.h. blir standardavviket for stakar på same høgde vesentleg større (figur 5.22) . Dette kan ha samband med at usikkerheita er større i akkumulasjonsområdet. Huss et al. (2009) finn ei usikkerheit på 0,1 m v.e. i ablasjonsområdet, og tilsvarande 0,3 m v.e. i akkumulasjonsområdet. Skilnaden mellom områda kjem av setting av firn i akkumulasjonsområdet, stakar som lettare sig på firn og større sannsyn for refrysing av smeltevatn høgare oppe. På Hellstugubreen stod stakane i botnane og stakane i tilknytning til dei periodevis eller heile sesongen på firn. Dette er difor med på å forklare den større skilnaden i akkumulasjonsområdet, men usikkerheit åleine kan ikkje forklare dei største skilnadane.

Analyse av globalstråling viser at det er større skilnad på kor mykje stråling dei ulike stakane får i løpet av smeltesesongen over 1800 m.o.h. Akkumulasjonsmålingane viser også større skilnad i snømengde for stakar på same høgde. Dette gjeld frå H45 (1940 m.o.h.) og oppover mot botnane. Den største skilnaden i ablasjon for stakar på same høgde er ved H60 (1802 m.o.h.). Stake H62 som ligg 20 m høgare har ein ablasjon 0,55 m v.e. lågare enn H60, i løpet av tre månadar med smelting. Denne skilnaden er også synleg i 2015, der H62 har 0,2 m v.e.

mindre smelting enn H60. Dette i løpet av ei periode på to og ein halv månad.

Høgdeskilnaden mellom stakane er ikkje stor, så dette skulle ikkje utgjere nokon stor temperaturskilnad. Vidare er gjennomsnittleg globalstråling relativt lik i dette området.

Akkumulasjonen 14. mai 2014 var også lik ved stakane, medan det 29. april 2015 var 0,23 m v.e. meir snø ved H60. Akkumulasjonen målt i mai kan difor ikkje vere årsak til skilnaden.

Ein annan viktig faktor i dette området er at snølinja ser ut til å spele inn. 13. juli 2014 var det snøfritt ved H60, medan det framleis låg snø igjen ved H62 (figur 5.12). Slik var det også under feltmåling 16. juli. Då låg det att 10 cm snø ved H62. Denne tidligare eksponeringa av is ved H60 og dermed lågare albedo ser ut til å vere årsak til skilnaden. Det kan sjå ut som dette er ein stad snølinja blir liggjande lenger fordi breen flatar ut. Det gjer at H60 som ligg nærare brefallet tidligare blir eksponert for breis, enn H62 som ligg lenger inne på breen. Det ser ut som dette er ein stad det er viktig å ha fleire stakemålingar, noko NVE opphavleg har. Påverknaden denne skilnaden har på sommarbalansen i 2014 kan ikkje bli funne fordi H62 var nedsnødd i mai 2014. I 2015 gjekk snølinja rett nedom H60 så tidlegare eksponering kunne ikkje spelt inn dette året.

Tabell 6.3: Verdier for helling, himmelretning, globalstråling og albedo. Akkumulasjon er målt 18. juni og ablasjonsverdiane er smelting i perioden 18. juni til 16. september 2014.

Stake nr.	Høgde (m.o.h.)	Helling (°)	Himmelretning (°)		Globalstråling (W/m ²)	Albedo 16.sep.14	Akkumulasjon (m w.e.)	Ablasjon (m w.e.)
H84	1547	8	354	Nord	128	0,28	is	-3,29
H13	1579	9	18	Nord	124	0,27	0,08	-3,12
H79	1584	8	21	Nord	127	0,31	0,32	-3,04
H78	1582	8	23	Nordaust	123	0,24	0,37	-3,14
H83	1643	8	359	Nord	129	0,42	0,51	-3,09
H81	1645	11	0	Nord	128	0,20	0,54	-3,19
H20-14	1641	12	11	Nord	123	0,27	0,62	-3,04
H80	1638	11	18	Nord	120	0,23	0,90	-3,14
H82	1694	10	332	Nordvest	125	0,30	0,77	-2,86
H26-14	1697	10	11	Nord	127	0,26	0,52	-2,91
H29-13	1750	12	13	Nord	125	0,27	0,55	-2,69
H60-14	1802	8	10	Nord	142	-	0,63	-2,60
H61-12	1802	8	38	Nordaust	145	-	0,32	-
H62-14	1823	5	44	Nordaust	146	0,22	0,72	-2,06
H77	1810	3	30	Nordaust	144	0,26/0,37	0,74	-2,36

I akkumulasjonsområdet har stakane i tilknytning til botnane mindre ablasjon enn stakane langs senterlinja. Tabell 6.4 samstiller dei målte og utrekna faktorane som påverkar ablasjonen, og viser skilnadar for stakar på same høgde. NVE-staken H44 ligg stort sett ved den gjennomsnittlege ablasjonen for stakar på same høgde. Den ser difor ut til å ha ei representativ plassering som fangar godt ablasjonen i området. Stakane i tilknytning til botnane (H71, H72, H73) har mindre ablasjon enn stakane midt på breen (H44, H45) (tabell 6.4).

Lågare globalstråling og skugge frå fjella omkring kan vere ei årsak. Stake H73 har i tillegg 0,6 m meir snø enn H45 i april, noko som svarar til 0,36 m v.e. Dette gir ei lenger periode med snø og høgare albedo, enn andre stakar på same høgde.

Stake H71 ligg i eit område som ser ut til å ha høgare globalinnstråling enn tilgrensande område. Snømengda her er litt lågare enn ved senterlinja. Likevel blir det målt 0,33 m v.e. mindre smelting her enn ved stake H44 (senterlinje). Årsaka til det kan vere at staken er plassert i tilknytning til ein botn. Dette gjer at staken får tilført snø, slush og smeltevatn frå botnen, noko som fører til at albedoen blir høgare her gjennom heile smeltesesongen. I september hadde H71 to cm lys attverande snø, medan dei to andre stakane hadde grå pjoletteris. Analyse av snølinja viser også at snøen blir liggjande att her (figur 5.12). H71 ser difor ut til å ligge i eit spesielt område som ikkje er representativt for ablasjonen andre stadar på same høgde.

Tabell 6.4: Verdier for helling, himmelretning, globalstråling og albedo for stakar over 1850 m.o.h. i 2014. I tillegg er vinterbalansen bw og sommarbalansen bs ved stakane vist.

Stake nr.	Høgde (m.o.h.)	Helling (°)	Himmelretning (°)		Globalstråling (W/m ²)	Albedo 16.sep.14	bw (m w.e.)	bs (m w.e.)
H43-13	1875	9	352	Nord	143	-	1,11	
H44	1898	7	351	Nord	151	-	1,29	-2,23
H70	1900	6	8	Nord	151	-	1,11	-2,31
H71	1899	10	92	Aust	162	0,38	1,21	-1,90
H45	1946	4	335	Nordvest	162	-	1,34	-1,94
H72	1952	6	5	Nord	155	-	1,44	-1,81
H73	1941	12	40	Nordøst	142	-	1,70	-1,63
H46nord	1957	1	321	Nordvest	157	-	1,43	
H48	2073	7	99	Aust	167	-	1,80	-1,73
H74	2060	16	59	Nordøst	142	0,42	1,42	-1,71
H75	2084	3	57	Nordøst	140	0,43	1,15	-1,43
H76	1992	11	37	Nordøst	134	0,36	1,28	-1,43

Når det kjem til botnane skil den nordlegaste botnen seg frå dei andre. H75 (nordleg botn) har høvesvis 0,27 og 0,36 m v.e. mindre smelting enn H74 og H48. Om lag same skilnaden gjeld for H76. Denne staken ligg 90 meter lågare enn H75 men i same botn. Ablasjonen i denne botnen stemmer ikkje overeins med ablasjonen på resten av breen. Skilnaden kan kome av at det er mykje snø i dette området, noko som gir høgare albedo enn ved H74 som hadde blåis delar av sesongen. I tillegg er den globale innstrålinga lågare i dei to nordlegaste botnane (H74, H75, H76).

Ein annan vel så viktig faktor når det gjeld botnane er feilkjelder i måleprosessen. Akkumulasjonsmålinga i april er viktig for å vite kor mykje snø som ligg att over

sommaroverflata. Normalt blir dette gjort nedanfrå og oppover slik at ein lettare kan følgje firnlaget når det dukkar opp. På grunn av sprekker og vanskeleg terreng blei sonderinga gjort ovanfrå og ned. Dette gjorde det vanskeleg å identifisere sommaroverflata, noko som gjer målingane ved stake H74, H75, H76 meir usikre enn ved H48. Der blei sonderingane gjort nedanfrå. Vidare var sonderingane vanskelegare ved H75 og H76 fordi denne botnen hadde svært mykje firn. Sondering på firn er generelt vanskelegare og mindre nøyaktig enn på is. Sondering til is kan gjerast med ei nøyaktighet på nokre cm avhengig av overflata, men på firn kan massebalansen lett bli over- eller underestimert (Thibert et al., 2008). Sidan målingar ikkje har vore gjort i den nordlegaste botnen før var det vanskeleg å vite kvar firnlaget burde vere, og det er sannsynleg at det kan ha blitt sondert til eit islag som låg over den faktiske sommaroverflata. Dette kan ha gitt ei underestimering av massebalansen i den nordlegaste botnen. Det hadde difor vore interessant å sett om ein fekk tilsvarende resultat ved ei ny måling. Dette var ikkje mogleg fordi stakane var snøa ned i 2015.

Resultat frå tidlegare målingar på Hellstugubreen viser at botnen der stake H74 står i dag har vore målt tidlegare (NVE-brearkiv). Tabell 6.5 viser resultatet frå desse målingane som føregjekk i tre år. I 1974 og 1975 var det mindre smelting ved H74 enn ved H48, medan det i 1977 var liten forskjell. Huss et al. (2009) finn ei usikkerheit på 0,3 m v.e. for måling av årsbalansen ved individuelle stakar i akkumulasjonsområdet. Skilnaden i sommarbalansen ved dei to botnane ligg godt under denne usikkerheita ved alle målingane. Det ser derfor ikkje ut til å vere nødvendig med målingar i botnen ved H74.

Tabell 6.5: Stakemålingar ved H48 og H49 som ligg i same botn, samanlikna med stakemålingar ved H74 i åra 1974, 1975 og 1977.

År	Stake	Høgde (m.o.h.)	bs (m v.e.)	bs skilnad
1974	H48	2079	-0,21	0,21
1974	H74	2076	0,00	
1975	H49	2070	-1,20	0,20
1975	H74	2072	-1,00	
1977	H74	2052	-1,10	0,07
1977	H48	2079	-1,03	
1977	H49	2067	-1,03	

Det er vanskelegare å sei korleis den nordlegaste botnen påverkar balansen på grunn av den store usikkerheita i målingane. Bresprekkene i dette området er store og terrenget kan vere krevjande. Det er difor viktig som Dyurgerov (2002: s.34) skriv «to keep the effort within reason». Sannsynet er stort for at innsatsen med å samle inn data i denne botnen er større enn nytten av dei.

6.3 Målte og prøvde feilkjelder innan tradisjonell metode

6.3.1 Representativiteten til stakenettet

Det utvida stakenettet i 2014 og det opphavlege NVE stakenettet gir resultat med 0,1 m v.e. skilnad. Dette er innafor usikkerheita i målingane som normalt ligg på 0,2 - 0,3 m v.e for årsbalansen (Kjøllmoen et al., 2010). Det tyder på at det opphavlege stakenettet er representativt for ablasjonen på breen, og at eit utvida nettverk ikkje er nødvendig for å fange ablasjonen på breen. Skilnadar funne i kapittel 6.2 ser ikkje ut til å ha ein signifikant påverknad på sommarbalansen. I tillegg ser det opphavlege stakenettet generelt ut til å representere middelablasjonen.

Utrekning av Bs ved hjelp av mindre stakenett (i åra 1963, 1966 og 2014), viser generelt like verdiar i høve Bs rekna ut ved hjelp av alle stakane. I alle tilfella både med bruk av fire, åtte og tolv stakar er verdiane godt under 0,2 m v.e (figur 5.33). Dette gjeld både det utvida stakenettet i 2014 og det ekstensive stakenettet som blei nytta på 60-talet. Tilsvarende resultat blei funne av Fountain og Vecchia (1999) der fem til ti stakar blei sett passende for alpine brear mindre enn 10 km². I dette tilfelle ser også fire stakar ut til å vere nok for regresjonsmetoden.

Figur 5.33 viser at spreinga i verdiane blir mindre til fleire målepunkt som er med i utrekninga. Dette viser at ein kan vere sikrare på eit resultat rekna ut ved hjelp av mange stakar enn eit resultat med bruk av færre målepunkt. Ein feil i eit av målepunkta vil få mykje større påverknad på eit resultat rekna ut ved hjelp av fire målepunkt, enn eit resultat rekna ut ved hjelp av tolv målepunkt. Ein annan grunngeving for den større spreinga i verdiar ved bruk av fire stakar er at det er fleire ulike kombinasjonar av fire stakar enn det er for åtte og tolv stakar (Fountain og Vecchia, 1999). Dette gjer at ikkje alle stakane blir bytta ut for kvar utrekning med tolv stakar slik at utskiftinga ikkje har like mykje påverknad på resultatet.

Sjølv om resultata blir forholdsvis like vil få målingar auke sannsynet for å måle stadar som ikkje er representative (Jansson, 1999). Denne feilkjelda blir imidlertid liten dersom eit ekstensivt nettverk blir nytta ei periode, for så å minimere dette. Då har ein oversikt over ablasjonsmønsteret, og kvar målingar bør bli gjort. Dette bør i følgje Zemp et al. (2013) bli gjort kvart tiande år for å revurdere det romlege massebalansemønsteret. Vidare må ein også

rekne med at nokon stakar forsvinn, blir bøygde eller smeltar ut. Dette gjer at ein må ha meir enn fire stakar på breen sjølv om det er mogleg å finne massebalansen berre med bruk av dei. Derfor ligg det optimale talet på stakar for Hellstugubreen over fire stakepunkt. Til dømes bestod det opphavelige stakenettet i 2014 av tolv stakar, men berre åtte av dei var synleg i mai og kunne brukast til å finne årsbalansen.

I 2014 er det ved bruk av åtte stakar ei klynge med utrekningar som avvik frå dei andre. Denne klynga med punkt har rundt 0,10 m v.e. mindre sommarbalanse enn B_{Salle} (Figur 5.33). Ei vidare undersøking av dette avviket viste at alle desse punkta tilfeldigvis hadde både stake H76 og H71 i utrekninga. Begge desse stakane avvik frå andre stakar ved same høgde, og har lågare ablasjon enn gjennomsnittet. Derfor blir sommarbalansen ein god del lågare enn B_{Salle} for desse fire utrekningane.

Stakane som blei brukt i B_s -utrekningane ved bruk av mindre stakenett blei ikkje plukka ut heilt tilfeldig, men frå ulike høgdenivå på breen. Ut i frå desse nivåa blei kombinasjonar av berre laterale stakar, berre stakar langs senterlinja og ein kombinasjon valt. Sidan sommarbalansen generelt blei lik ser ikkje laterale skilnadar ut til å ha særleg stor påverknad. Dette samsvarar med Cogley (1999) og Fountain og Vecchia (1999) som fann at fleire målingar rundt same høgde ikkje gir meir informasjon. Dette fordi målingane i nær omkrins har ein høg korrelasjon som minkar med høgda. Det viktigaste er ikkje å ha mest mogleg stakar, men å ha oversikt over smeltemønsteret, og kva som er dei mest representative plasseringane. Til dømes har analysar vist at stake H71 og H76 ikkje er representative for ablasjonen i området, medan H44 er ei optimal plassering. Det er vanskeleg å gi eit eksakt tal på stakar som er optimalt for målingane. Likevel ser ikkje antalet ut til å vere så viktig så lenge ein har eit minimum og at plasseringane er bestemt ut frå ablasjonsmønsteret.

Sjølv om spreinga av verdiane er mindre ved bruk av mange stakepunkt gir ikkje resultatet ein klar trend i RMSE med antal stakar (tabell 5.9). Fountain og Vecchia (1999) fann derimot ein RMSE som gjekk ned med auka tal på stakepunkt. Dette viser at den gjennomsnittlege feilmarginen går ned, og at det er godt samsvar mellom modellen og dei faktiske målingane.

I dette tilfelle er gjennomsnittleg RMSE akseptabel (rundt 0,20-0,26 m v.e.) ved bruk av både mange og få stakar, sjølv om den ikkje går systematisk ned med auka tal på stakar. Ser ein nærare på kvar einskild RMSE-verdi blir det derimot tydeleg at utrekningane med fire stakar har stort sprik i verdiar, frå 0,04 og opp mot 0,4 m v.e. Dersom staketalet aukar blir ikkje variasjonen i RMSE så stor, og verdiane ligg nokså jamt rundt 0,20 både ved bruk av åtte og

tolv stakar. Dette viser at usikkerheita går ned med bruk av fleire stakar. Det at avviket ikkje blir lågare enn 0,20 ved bruk av mange stakar kan kome av at fleire målepunkt med større usikkerheit blir teke med. Døme på det er stakane i botnane der både usikkerheita og skilnaden i ablasjon er større. Dette fører til at nokon av punkta blir liggjande langt frå regresjonslinja og RMSE-verdien går opp. Det er også grunnen til at stakane i botnane og stakane i nærleiken av dei, estimerar sommarbalansen dårlegare enn stakar andre stadar på breen i 2014 (figur 5.34).

6.3.2 Metodar for utrekning

Sommarbalansen kan reknast ut på mange ulike måtar, nokre meir subjektive og manuelle enn andre. Dei ulike metodane viste seg å gi svært like resultat med skilnad på eit par cm v.e. i 2014. Kriging er den mest sofistikerte og automatiske metoden, men både regresjonsmetodane og den heilt manuelle metoden ga tilsvarande resultat. Dette viser at val av metode ikkje påverkar Bs i nemneverdig grad på Hellstugubreen, og resultata er robuste.

Fordelen med den manuelle metoden er at punktmålingar som er litt usikre kan takast med i utrekninga, men ikkje bli lagt like mykje vekt på som andre målingar. Til dømes stakar som har vore skeive. Ulempa er at metoden blir svært subjektiv og at usikkerheita blir stor over den høgaste staken og under den lågaste. I desse områda er det ingen punkt å trekke linja til, og den må teiknast fritt etter trenden til linja. Lineær regresjon er effektivt, enkelt og objektivt. Det same kan seiast om kvadratisk regresjon, men denne metoden krev litt fleire rekneoperasjonar. Ein føresetnad er at ablasjonen minkar mest mogleg lineært eller kvadratisk med høgda over havet. Ablasjonsgradienten blir først og fremst påverka av temperaturen som minkar med høgda over havet (Jansson, 1999). Dette er grunnlaget for at lineær og kvadratisk regresjon kan nyttast til å ekstrapolere informasjonen frå stakenettverket. Andre parameterar som stråling, skugge og albedo påverkar også smeltinga, og introduserer høgdeuavhengige forskjellar i ablasjon (Jansson, 1999). Dette er tydeleg i ablasjonen for stakar over 1800 m.o.h. på Hellstugubreen. Derfor blei kvadratisk regresjon prøvd ut for å sjå om denne metoden passar betre til ablasjonen enn den lineære. I 2014 gir alle ablasjonsgradient metodane svært like resultat. Det er ingen forskjell i r^2 for lineær regresjon og kvadratisk regresjon og modellane passar begge godt til ablasjonen. Sidan resultata blir tilsvarande like talar det for å bruke lineær regresjon som er enklast og mest effektivt. Dette samsvarar også med Rasmussen og Andreassen (2005) som fann svært lineære gradientar både for vinter og sommarbalansen på Hellstugubreen.

Resultata frå 2015 viser ei ulempe med ukritisk bruk av regresjon, nemleg at den lett kan gi positiv ablasjon i områder høgt over havet (Jansson, 1999). Dette er tydeleg i sommarbalansen for 2015 der dei høgareliggjande områda har akkumulasjon i løpet av ablasjonssesongen (figur 5.36). Dette skjer litt lågare nede ved bruk av lineær regresjon enn ved bruk av kvadratisk regresjon. Sommarbalansen blei den same ved bruk av begge regresjonsmetodane og skilnaden i høve manuell metode vart 0,14 m v.e. Sjølv om dette ikkje er eit stort avvik er det ei kjelde til feil som det er viktig å vere klar over. Positiv ablasjon blir som regel ikkje sett på som realistisk og er lett å unngå ved manuell utrekning. Likevel er også den manuelle metoden usikker i 2015. Dette fordi den høgaste staken ligg 1945 m.o.h. og dermed har ein ingen punkt å trekke linja til over denne høgda.

Resultatet frå 2014 og 2015 viser at ablasjonen er tilnærma lineær med høgda over havet og at både kvadratisk og lineær regresjon er robuste metodar. Likevel har ein meir kontroll ved bruk av manuell metode, og ein kan unngå feil som positiv ablasjon i høgareliggjande områder.

Kriging er ein meir avansert metode og krev kunnskap om programvare, parameterar og ulike metodar for kriging. Denne metoden interpolerar ablasjonen romleg og kan dermed gi ulike ablasjonsverdiar på områder ved same høgde, i motsetnad til regresjonsmetodane. Likevel gir denne metoden om lag same resultat som dei andre metodane. Dette viser at kriging ikkje er nødvendig for å få ein meir nøyaktig balanse. Tilsvarende resultat blir funne av Jansson (1999). Han legg til at dersom romleg fordeling er av interesse vil det vere nødvendig å ta i bruk ein distribueringsmetode som kriging. Dei tre metodane for kriging ga nesten heilt lik sommarbalanse, men den romlege fordelinga av ablasjonen er ulik (figur 5.37). Dette stemmer overeins med Hock og Jensen (1999). Dei fann at bruken av ulike parameterar hadde stor påverknad på romleg fordeling, men lite å seie for den årlege spesifikke balansen. Cokriging er den einaste metoden som gir større ablasjon i områda på bretunga som ligg under den lågaste staken. Dei to andre metodane ekstrapolerar ikkje til verdiar lågare enn staken med mest smelting. På denne måte interpolerer og ekstrapolere cokriginga betre smeltinga enn dei to andre metodane. Høgde som sekundærvariabel forbetrar dermed interpoleringa. Likevel krev cokriging mykje meir estimering og parameterane må tilpassast manuelt, dette gjer at feil lettare blir introdusert.

6.3.3 Effekten av skeive stakar og type stakar

Skeive stakar viser for stort snødjup og vil føre til at ein registrerar for stor smelting.

Resultatet frå stakevinkelmålingane viser at dei aller fleste stakane som var skeive under akkumulasjonsmåling i 2014 retta seg opp igjen i løpet av smeltesesongen (tabell 5.12). Dette tyder på at dei blir skeive på grunn av stort press frå snøen rundt. Etter kvart som snøen smeltar, og eventuelt eit ledd blir teke bort, rettar dei seg oppatt. Andre gongar kan ein vere uheldig med stakeplasseringa, slik at smeltevasskanalar gjer målinga vanskeleg og usikker (figur 5.38).

Normalt blir snøen ved stakane målt med sondestang ved akkumulasjonsmåling. Dette vil vere med på å gjere feilen ved måling på skeive stakar mindre, fordi dei ikkje blir brukt til å rekne ut snødjupta. Dermed er det berre feil i løpet av smeltesesongen som blir registrert. Denne feilverdien blei på 0,01 – 0,03 m v.e. ved stakar som var litt skeive ($6\text{--}10^\circ$) ei periode eller stakar som var ganske skeive ($18\text{--}20^\circ$) ei mindre periode. Stakar som var 20° skeive i lengre periodar påverka ablasjonen med opp i 0,10 m v.e. i dette tilfellet. Dette er same verdi som Huss et al. (2009) estimerar for usikkerheita i årleg ablasjon på individuelle stakar i ablasjonsområdet. I akkumulasjonsområdet ligg verdien på 0,3 m v.e. i følge Huss et al. (2009). Det tyder på at stakar må vere svært skeive ($20^\circ+$) over ei lengre periode, før det gir ei større usikkerheit enn den generelle måleusikkerheita ved stakane.

Tilleggsablasjon (smelting etter minimumsmåling) blir normalt målt i mai ved å samanlikne akkumulasjon målt med sonde og akkumulasjon rekna ved hjelp av stakelengda. Dersom sonden viser meir snø enn det skal vere i forhold til stakelengda, er det mogleg det har smelta meir etter minimumsmålinga. For at dette skal fangast opp må det målast på rette stakar sidan skeive stakar vil vise større snødjup enn det eigentleg er.

Type stake kan også påverke ablasjonen. Aluminiumsstakar blir brukt av NVE på grunn av styrken i metallet. Dette gjer at stakane toler presset frå snøen i vinterperioden, utan å knekke og bli bøygde av. Ulempa med dei er at høge temperaturar og innstråling, kan føre til at dei blir varma opp og smeltar ut av boreholet eller nedover i isen eller snøen (Kaser et al., 2003). For å hindre dette er det vanleg å sette trepropp på aluminiumsstakar som står på firn.

Oppvarminga fører vidare til at det blir danna store smeltehol rundt aluminiumsstakane. Dette fører lett til at stakane blir skeive. Test av PVC-stakar viste at dette også skjer med plaststakar. Hola rundt PVC-stakane var like store som for aluminiumsstakane. Likevel ser ståltråden ut til å fungere og holde PVC-stakane rette.

I dette tilfelle var det berre fire PVC-stakar som var synleg i ei lita periode. Dette er utilstrekkeleg for å kunne konkludere, og fleire testar må utførast for å kunne sei noko sikkert om bruken av PVC-stakar. Resultatet viser ingen samanheng mellom dei ulike testområda og skilnad i ablasjon ved dei ulike typane stakar. Til dømes har stakane med trepropp meir ablasjon enn dei to andre stakane i eit testområde, men mindre ablasjon enn dei andre stakane i eit anna område. Desse skilnadane kan kome av variasjonar i mikrotopografi og måleusikkerheit like mykje som forskjellar på grunn av type stake. Tachon (2015) fann tidvis kald is på Hellstugubreen både ved H13 og H44. Dette kan vere med på å gjere effekten av at stakane smeltar seg nedover mindre.

Ulempa med PVC-stakane er at dei er svakare og kan knekke. Difor tilrår ikkje Kaser et al. (2003) bruk av plaststakar. Spesielt i akkumulasjonsområdet kan desse stakane bli for skjøre. Dette på grunn av trykket frå store snømengder. Vidare kan ikkje PVC-stakane skøytast og lagast lengre (under minimumsmåling), med det systemet som blei brukt her. Difor vil dei ikkje vere synlege under akkumulasjonsmåling. Likevel kan dei vere eigna i ablasjonsområdet der det er stor smelting og lette sonderingstilhøve. Dette fordi dei kan borast langt ned i isen. Stakane kan også settast ut under akkumulasjonsmåling slik at dei kan brukast til å finne årsbalansen. På dette området må fleire undersøkingar til.

6.4 Usikkerheit i feltmålingar og analysar

6.4.1 Tettleik

Konvertering av snødjup til vassekvivalentar introduserer usikkerheit i massebalansen. Målingar gjort ved nokre punkt skal brukast over heile snøoverflata. Denne usikkerheita blir mindre ved å måle tettleiken under kvart feltopphald. Sett bort frå måling av tettleiken til firn i botnane i 2014 og attverande snø i 2015 så blei dette praktisert. Tettleiken til attverande snø målt på ei rekke brear hausten 2015 viste verdiar rundt 600 kg/m^3 (Andreassen, pers.komm.), og burde ikkje introdusere stor usikkerheit. Måling av firntettleiken i botnane kunne gitt betre grunnlag for sikrare utrekningar. Likevel er usikkerheita uansett stor her på grunn av mogleg feil i akkumulasjonsmålinga. Test av firnverdiar mellom 550 og 800 kg/m^3 ga ein skilnad i sommarbalanse på $0,08 \text{ m v.e.}$ ved stake H75 og $0,04 \text{ m v.e.}$ ved H76. Sidan det berre var i denne botnen det smelta firn vil denne feilkjelda ha lite påverknad i dette tilfelle. Det kunne vore ei vesentleg kjelde til usikkerheit dersom det hadde smelta mykje firn over eit større

område på breen. Likevel trengs det meir data for å kunne gi ein konklusjon på kor mykje påverknad val av firntettleik har på sommarbalansen.

Ulike metodar kan også brukast for å konvertere snødjupet til vassekvivalentar. I følge Jansson (1999) er metodar som tek omsyn til tettleiksauken med snødjupet best egna til å gjenspegle dei faktiske tilhøva i snøen. Bruk av kumulativ vassekvivalent med snødjupet kan gi høgare nøyaktigheit fordi lag nedover i snøen med ulik tettleik blir fanga opp. Likevel viste test av gjennomsnittstettleik at skilnaden i resultata ikkje var stor. Dette samsvarar med Jansson (1999) som ikkje fann signifikante skilnadar i massebalanse ved bruk av ulike metodar for konvertering til vassekvivalentar. Det er også usikkerheiter i sjølve målingane fordi den blir gjort manuelt og dermed blir påverka av nøyaktigheita til prøvetakaren, avlesingsfeil og til dømes skrivefeil.

6.4.2 Albedo

Albedoen på Hellstugubreen blei berre målt i september 2014. Den gir derfor berre ein indikasjon på korleis tilhøva var ved stakane på dette tidspunktet. Det er for få målingar til å kunne seie noko om albedoen generelt på breen, og til ulike tidspunkt. Målingane blei gjort i løpet av ein heil dag på breen, noko som fører til at endringar i til dømes vêr, skylag og sola sin posisjon kan påverke resultatet. Likevel var vêret veldig stabilt denne dagen med sol og heilt blå himmel, og målingane blei avslutta når sola byrja å stå lågt. Dette skal difor ikkje ha hatt stor påverknad på resultatet. Stakane i botnane blei målt ein dag seinare enn dei andre, men med tilsvarande vêrforhold. Ein annan fordel er at det i dette tilfelle er mest interessant å sjå på skilnadar i albedo rundt same høgdenivå. Desse målingane blei gjort på om lag same tidspunkt, noko som minimerar skilnadar i vêrtilhøva.

6.4.3 Endring i breutstrekking og overflate

Breomkretsen og arealfordelinga som er brukt er frå laserskanning av Hellstugubreen i 2009. Breen har trekt seg tilbake 65 m (NVE, 2015) i perioden frå 2009-2014. Dette arealet er så lite at det ikkje bør ha stor påverknad på årsbalansen. Ei anna feilkjelde er ekstrapolering av vinter- og sommarbalansen til høgdeintervall som ikkje har vore målt. Ved bruk av manuell metode blir linja trekt etter skjønne mellom punkta. Over det høgaste punktet og under det lågaste må linja trekkast etter den generelle trenden. Dersom områda som ligg utanfor målepunkta er store introduserer dette usikkerheit. I 2014 gjeld dette små områder i dei aller høgaste og lågaste delane av breen (2150-2229 m.o.h. og 1482-1500 m.o.h.), både for vinter-

og sommarbalansen. Desse høgdeintervalla har så lite areal at det gir lite utslag på årsbalansen. I 2015 var den høgastliggjande staken 1945 m.o.h, alle dei andre stakane var snøa ned. Dette gir eit stort område utan måling noko som gjer den manuelle metode usikker. Vinterbalansen hadde målingar i alle høgdeområda unnateke 1482-1500 m.o.h., som har eit areal på 0,01 km².

6.4.4 Globalstråling

Analysen av globalstråling på Hellstugubreen viser variasjonen i innkomande kortbølga stråling på breoverflata. Utrekningane er gjort i ArcMap og er ikkje faktiske målingar på breen. Dette gjer at analysen har sine avgrensingar. Transmissiviteten er avgjerande for kor mykje stråling som når overflata, og denne parameteren er avhengig av mellom anna skylaget. Transmissiviteten blei satt til 0.45 etter middelverdi frå AVS på Storbreen i perioden 1. juni til 10. september (Andreassen et al., 2008b). Avstanden mellom breane er om lag 15 km i luftlinje. Dette gjer at vêrtilhøva kan vere forskjellige, spesielt sidan dette er brear som ligg høgt over havet, men det er den næraste målinga som finns.

Diffusstålingsandel blei satt til 0.3 som er verdi for generelt klarvêr med 30% diffus stråling og 70% direkte stråling. Denne kunne vore satt noko høgare sidan vêret i breområda i Jotunheimen generelt er skiftande, og har fleire overskya dagar enn dagar med klarvêr. Uansett viser resultatet skilnadar i globalstråling på ulike delar av breen. Dette kan vere med å forklare ablasjonsmønsteret, sjølv om absolutt verdiane vil variere med vêr og skydekke i verkelegheita. Samanlikna med verdiar frå Storbreen ligg Hellstugubreen ein del lågare i gjennomsnittsverdi. Dette gjeld for perioden 1. juni til 10. september. På Storbreen varierer gjennomsnittet mellom 183 og 185 W/m², medan Hellstugubreen ligg på 152 W/m² for same periode i 2014. Dette kan kome av at Storbreen er ein vid bre med fjell som ikkje ruvar veldig høgt (Heidardsdottir, 2012). Dette gjer at Storbreen ser ut til å ha mindre skugge enn Hellstugubreen, som har ei small bretunge med høge fjell rundt. I tillegg har Hellstugubreen botnar som fort hamnar i skuggen bak fjella. Vidare er verdiane for Storbreen faktisk målte verdiar, og ikkje rekna ut i ArcMap slik som på Hellstugubreen.

6.4.5 Klassifisering av snølinje

Den temporære snølinja er ein viktig parameter i energibalansen som kontrollerer smeltinga på breen (Adam et al., 1997). På grunn av den signifikante påverknaden snølinja har på smeltinga gir den eit bilete av smeltemønsteret på breen. Dei klassifiserte bileta gir oversikt over områder der snøen blir liggjande igjen, eller blir tidleg eksponert. Stakemålingar i slike

område er ikkje nødvendigvis representative for eit større område. For at eit stakenett skal kunne reduserast må massebalansemønsteret vere kjent (Cogley, 1999). Dette gir satellittbileta eit inntrykk av, som til dømes forholda ved stake H71 i 2014 (kap. 6.2.)

Satellittbiletet for september 2014 viser ei likevektslinje nesten 100 m høgare enn gjennomsnittleg likevektslinje 2000-2013 (Andreassen et al., 2005). I 2015 var likevektslinja rundt 120 m lågare enn dette gjennomsnittet. Endring i likevektslinja fører til endring i utstrekking av ablasjons- og akkumulasjonsområdet. På denne måten er likevektslinja ein indikator på massebalansen, og den kan bli brukt på å estimere den (Rabatel et al., 2005). Snølinja funne ved hjelp av klassifisering stemmer nokså godt overeins med den utrekna likevektslinja begge åra, Sjølv om datoane ikkje er heilt dei same. I 2014 er det ein dag som skil feltmålinga og satellittbilete, medan det i 2015 var tolv dagar.

Klassifikasjon kan vere vanskeleg å utføre dersom det er mykje skugge, skyer eller stein i bilete. Dette gjer at det kan vere mørke områder over snøen som gjer at den blir klassifisert som is i staden for snø. Nokon av områda som blir klassifisert som is kan også vere svært vassholdig snø. Vidare kan overgangen mellom snø og is vere problematisk i klassifiseringa. Desse områda skaper lett overlapp mellom klassene fordi det er lite kontrast mellom is og snø i overgangssonene. Likevel er klassifikasjon ein objektiv og oversikteleg metode i forhold til subjektiv definering i felt.

7 Konklusjon

Denne oppgåva har tatt føre seg massebalansemålingar på Hellstugubreen i 2014 og 2015. Fokuset har vore på ablasjonsmønster, representativiteten til stakenettet, og feilkjelder i måle og utrekningsprosessen. I denne samanheng blei eit utvida stakenett satt ut på Hellstugubreen for å studere dette nærmare.

- Den store skilnaden i årsbalanse i 2014 og 2015 skuldast først og fremst skilnad i ablasjonstilhøva. Lufttemperaturen har stor påverknad på tilhøva, og det er ein klar samanheng mellom graddagsfaktor og skilnad i ablasjon dei to åra.
- Ablasjonsstakar på lik høgde i ablasjonsområdet viser tilnærma lik ablasjon. Konklusjonen blir difor at stakane langs senterlinja er representative og at det ikkje trengs fleire målingar her.
- Rundt 1800 m.o.h. er ablasjonsmønsteret varierende på grunn av snølinja, og skilnaden i ablasjon er oppe i 0,55 m v.e. Full balanse er ikkje tilgjengeleg for alle desse stakane, så påverknad på sommarbalansen er ikkje funne. Likevel anbefalast det spesielt i år med mykje smelting, med fleire målingar i dette området. Dette for å få mest mogleg representative stakemålingar.
- I akkumulasjonsområdet er skilnaden i ablasjon for stakar på same høgde større. Dette heng saman med større usikkerheit, større skilnad i globalstråling og i snøtilhøve i løpet av smeltesesongen. Stakane langs senterlinja ligg likevel rundt gjennomsnittet og er dermed representative for smeltinga ved det gitte høgdeintervallet.
- Botnen ved H74 har ein ablasjon tilnærma lik botnen som har vore målt tidlegare, H48. Målingar på 70-talet viser heller ikkje store avvik i høve H48 i denne botnen. Det å utvide med målingar i botnen ved H74 gir difor ikkje noko meir informasjon om ablasjonen på breen. Botnen lengst nord har eit avvik på over 0,3 m v.e. både rundt same høgde som H48 og 90 meter lågare. Dette område kan vere påverka av feilkjelder i sonderingsprosessen. Difor er det vanskeleg å sei noko sikkert om korleis denne botnen eigentleg påverkar balansen. Bresprekkene i botnen er store og terrenget kan vere krevjande. Difor blir det likevel påstått at måling av botnen ved H75 krev ein større innsats enn den nytten målingane vil gi.
- Det utvida stakenettet gir ein sommarbalanse 0,1 m v.e mindre enn det opphavlege NVE-stakenettet. Dette er innafor usikkerheita i ablasjonsmålingane, og det er dermed rimeleg å seie at det opphavlege stakenettet er representativt for ablasjonen.

- Påverknaden av mindre stakenett viser at målenett heilt ned i fire stakar viser liten skilnad i sommarbalanse i forhold til sommarbalansen rekna med alle stakane. Likevel er spreinga i verdiar mykje større med bruk av få stakar, og RMSE varierer frå veldig låge til høgde verdiar. Dette viser at usikkerheita går ned med bruk av fleire stakar, og sannsynet for at stakane er representative aukar. Det er også tjeneleg med fleire stakar fordi ein må rekne med at noko stakar kan forsvinne, bli bøygde eller smelte ut.
- Laterale målingar på breen viser noko mindre ablasjon i nærleiken av botnane i 2014. Test av ulike mindre stakenett viser at dette generelt har lite å seie for sommarbalansen og at stakane har lite ny informasjon.
- Bruk av ulike metodar for å rekne sommarbalansen viser at både manuell metode, lineær regresjon og kvadratisk regresjon er robuste metodar. Likevel må ein, ved bruk av regresjon, vere på vakt etter positiv ablasjon i høgareliggjande områder. Denne ulempa talar for bruk av manuell metode, dersom målepunkta er godt fordelt med høgda. Interpolasjon ved kriging gir same resultat og det konkluderast difor at bruk av denne metoden ikkje gir eit meir nøyaktig resultat. Det er dermed meir effektivt, enkelt og like nøyaktig å nytte regresjon eller manuell metode.
- Måling av stakevinklar viser at dei aller fleste stakane som var skeive under akkumulasjonsmåling retta seg opp igjen i løpet av smeltesesongen. Dette tyder på at dei blir skeive på grunn av stort press frå snøen om vinteren. Utrekningane viser at stakane må vere 20° eller skeivare heile smeltesesongen, for at det skal ha påverknad på sommarbalansen.
- Test av PVC-stakar, stakar med trepropp, og vanlege aluminiumsstakar viser ingen samanheng i høve ablasjonsskilnadar. Fleire testar må utførast for å kunne få eit sikkert resultat. Ei stor ulempe med PVC-stakane er at dei ikkje kan forlengast slik at dei er synlege ved akkumulasjonsmåling.

Målingar og utrekningar i denne oppgåva viser at det opphøvelege stakenettet til NVE er representativt for smeltinga på Hellstugubreen. Det blir difor foreslått at desse målingane held fram inkludert utvida målenett på høgde med H60. Resultatet viser vidare at stakenettet kan gjerast endå mindre, men ein bør ha ein god buffer i forhold til at nokon stakar kan forsvinne, falle ut eller bli skeive. Feilkjelder ved bruk av tradisjonell metode har blitt analysert i forhold til skeive stakar, type stakar, tettleiken til firn, metode for interpolering og ekstrapolering av sommarbalansen og påverknaden til umålte områder som botnane. Det er vanskeleg å gi eit

nøyaktig tal på kor store feilkjeldene ved målingane er. Likevel viste nokon av dei testa usikkerheitene seg å vere veldig små, som val av utrekningsmetode og stakar som er skeive berre i periodar. Andre undersøkingar som bruk av ulike typar stakar og ulike tettleiksverdiar blei testa på eit for lite datagrunnlag til å kunne konkludere.

8 Vidare arbeid

Når det gjeld vidare arbeid er det fleire interessante undersøkingar som kunne vore gjort. Døme på dette er ein studie av ablasjonsmønsteret på Hellstugubreen bakover i tid, for å nytte den lange massebalanseserien breen har. Ein større test kunne også vore gjort av PVC-stakar sidan dei på grunn av vekta og borelengde er svært praktiske i felt. Det hadde også vore spennande å målt den nordlegaste botnen eit år til for å sjå om tilsvarande resultat blei funne eller ikkje.

Vidare hadde det vore interessant å gjort ei større undersøking av den temporale og romlege variasjonen i overflatealbedo. Det kunne vore gjort ved hjelp av satellittdata, noko som har vore gjort i fleire studiar, til dømes på Vest-Grønland (Knap og Oerlemans, 1996; Greuell, 2000) og Vatnajökull på Island (De Ruyter de Wildt et al., 2002). Klok et al. (2003) forklarar framgangsmåten med utleiing av albedo ved hjelp av satellittdata og diskuterer også usikkerheit ved metoden. Når det gjeld temporær snølinje har oppskyting av den nye satellitten Sentinel 2A i juni 2015 gjort at data med høgare romleg og temporær oppløysing er blitt tilgjengeleg (Barth og Winsvold, 2015). Desse data kunne vore brukt i ei vidare kartlegging av snølinja med høgare temporæroppløysing.

Endeleg hadde kartlegging av Hellstugubreen i 2019 vore interessant for å finne den geodetiske massebalansen i tiårs perioden frå førre kartlegging i 2009. Dette for å sjå om metodane gir tilsvarande resultat.

Referansar

- Adam, S., Pietroniro, A. & Brugman, M. (1997) Glacier Snow Line Mapping Using ERS-1 SAR Imagery. *Remote Sensing of Environment, Elsevier Science Inc.*, 61, s. 46-54.
- Andreassen, L. M. (1999) Comparing traditional mass balance measurements with long-term volume change extracted from topographical maps: a case study of Storbreen glacier, in Jotunheimen Norway, for the period 1940-1997. *Geografiska Annaler*, 81, s. 467-476.
- Andreassen, L. M. (2003) 'Hellstugubreen' i Kjøllmoen, B. (red.) *Glaciological investigations in Norway in 2002*. Norges Vassdrags- og energidirektorat, Oslo, s. 45-48.
- Andreassen, L. M. (2010) 'Hellstugubreen' i Kjøllmoen, B. (red.) *Glaciological investigations in Norway in 2009*. Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo, s. 56-60.
- Andreassen, L. M., Elvehøy, H. & Kjøllmoen, B. (2002) Using aerial photography to study glacier changes in Norway. *Annals of Glaciology*, 34, s. 343-348.
- Andreassen, L. M., Elvehøy, H., Kjøllmoen, B. & Engeset, R. V. (2015) Glaciological and geodetic mass balance of ten long-term glaciers in Norway. *The Cryosphere Discussions Accepted*, s. 1-40.
- Andreassen, L. M., Elvehøy, H., Kjøllmoen, B., Engeset, R. V. & Haakensen, N. (2005) Glacier mass-balance and length variation in Norway. *Annals of Glaciology*, 42, s. 317-325.
- Andreassen, L. M., Elvehøy, H., Kjøllmoen, B., Jackson, M. & Engeset, R. (2008a) *Long-Term Observations of Glaciers in Norway* i Orlove, B., Wiegandt, E. & Luckman, B. H. (red.) *Darkening Peaks: Glacier Retreat, Science, and Society*. University of California Press, California, s. 100-110.
- Andreassen, L. M. & Oerlemans, J. (2009) Modelling long-term summer and winter balances and the climate sensitivity of Storbreen, Norway. *Geografiska Annaler*, 91 A(4), s. 233-251.

- Andreassen, L. M., Van Den Broeke, M. R., Giesen, R. H. & Oerlemans, J. (2008b) A 5 year record of surface energy and mass balance from the ablation zone of Storbreen, Norway. *Journal of Glaciology*, 54, s. 245-258.
- Andreassen, L. M. & Winsvold, S. (2012) *Inventory of Norwegian Glaciers*. Norwegian Water Resources and Energy Directorate, Oslo.
- Anonymous. (1969) Mass-balance terms. *Journal of Glaciology*, 8(52), s. 3-7.
- Bamber, J. L. & Rivera, A. (2007) A review of remote sensing methods for glacier mass balance determination. *Global and Planetary Change*, 59(1-4), s. 138-148.
- Barth, V. L. & Winsvold, S. H. (2015) *Copernicus: Norge i rødt, grønt og blått* [Internett], Tilgjengeleg frå: <http://www.romsenter.no/index.php/Aktuelt/Siste-nytt/Copernicus-Norge-i-roedt-groent-og-blaatt>, Norsk Romsenter. [Lest 25.11.2015 2015].
- Bohling, G. (2005) *Kriging*. Kansas Geological Survey, Tech. Rep., USA.
- Braithwaite, R. J., Konzelmann, T., Marty, C. & Olesen, O. B. (1998) Errors in daily ablation measurements in northern Greenland, 1993-94, and their implications for glacier climate studies. *Journal of Glaciology*, 44, s. 583-588.
- Cogley, J. G. (1999) Effective sample size for glacier mass balance. *Geografiska Annaler*, 81 A (4), s. 497 - 507.
- Cogley, J. G., Adams, W. P., Ecclestone, M. A., Jung–Rothenhausler, F. & Ommaney, C. S. L. (1996) Mass balance of White Glacier, Axel Heiberg Island, N.W.T., Canada 1960-91. *Journal of Glaciology*. 42, s. 548-563.
- Cogley, J. G., Hock, R., Rasmussen, L. A., A.A., A., Bauder, A., Braithwaite, R. J., Jansson, P., Kaser, G., Möller, M., Nicholson, L. & Zemp, M. (2011) *Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms*. IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 86, IACS Contribution No. 2, UNESCO-IHP, Paris.
- Cuffey, K. & Paterson, W. S. B. (2010) *The physics of glaciers*. Butterworth-Heinemann UK.
- De Ruyter de Wildt, M. S., Oerlemans, J. & Björnsson, H. (2002) A method for monitoring glacier mass balance using satellite albedo measurements: application to Vatnajökull, Iceland. *Journal of Glaciology*, 48(161), s. 267-278.
- De woul, M. & Hock, R. (2005) Static mass-balance sensitivity of Arctic glaciers and ice caps using a degree-day approach. *Annals of Glaciology*, 42, s. 217-224.

- Dewalle, D. R. & Rango, A. (2008) *Principles of snow hydrology*. Cambridge University Press, New York.
- Dyurgerov, M. (2002) Glacier Mass Balance and Regime: Data of Measurements and Analysis *INSTAAR Occasional Paper*, 55. Meier, M. & Armstrong, R. (red), Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado, , s. 1-89.
- eKlima. (2015) *eKlima download webportal* [Internett], Tilgjengeleg frå: www.eKlima.no, Norsk meteorologisk institutt. [Lest 18.08.2015].
- ESRI. (2013) *What are the different kriging models?* [Internett], Tilgjengeleg frå: <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html#/na/00310000003q000000/>, ArcGIS Resources. [Lest 05.05.2015 2015].
- ESRI. (2014) *Area Solar Radiation (Spatial Analyst)* [Internett], Tilgjengeleg frå: <http://resources.arcgis.com/EN/HELP/MAIN/10.2/index.html#/009z000000t5000000>, ArcGIS Resources. [Lest 18.08.2015].
- Fischer, A. (2011) Comparison of direct and geodetic mass balances on a multi-annual time scale. *The Cryosphere*, 5, s. 107-124.
- Fountain, A. & Vecchia, A. (1999) How many stakes are required to measure the mass balance of a glacier? *Geografiska Annaler*, 81A (4), s. 563-573.
- Greuell, W. (2000) Melt-water accumulation on the surface of the Greenland ice sheet: effect on albedo and mass balance. *Geografiska Annaler*, 82A(4), s. 489-498.
- Haakensen, N. (1986) Glacier mapping to confirm results from mass-balance measurements. *Annals of Glaciology* 8, s. 73-77.
- Hannah, D. M., Gurnell, A. M. & McGregor, G. L. (2000) Spatio - temporal variation in microclimate, the surface energy balance and ablation over a cirque glacier. *International Journal of Climatology* 20, s. 733-758.
- Haug, T., Rolstad, C., Elvehøy, H., Jackson, M. & Maalen-Johansen, I. (2009) Geodetic mass balance of the western Svartisen ice cap, Norway, in the periods 1968–1985 and 1985–2002. *Annals of Glaciology*, 50(50), s. 119-125.
- Heidardsdottir, H. M. (2012) *Glacio-meteorological investigations on Storbreen, Norway*. Master Thesis in Geosciences, Department of Geosciences, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Oslo.

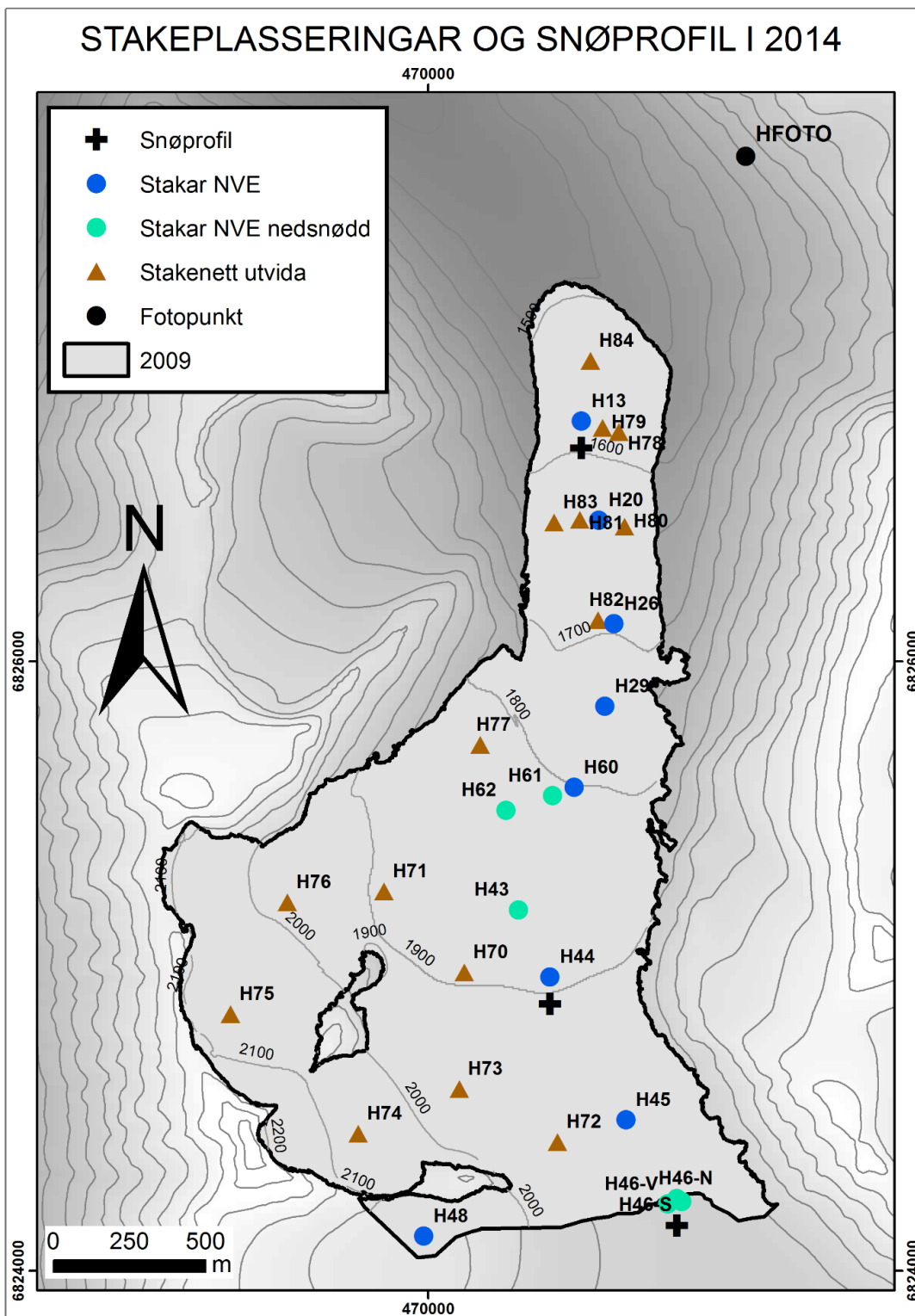
- Heywood, I., Cornelius, S. & Carver, S. (2011) *An introduction to geographycal information systems* Pearson Education Limited, England.
- Hock, R. (2003) Temperature index melt modelling in mountain areas. *Journal of Hydrology*, 282, s. 104-115.
- Hock, R. (2005) Glacier melt: a review of processes and their modelling. *Progress in Physical Geography*, 29, s. 362–391.
- Hock, R. & Jensen, H. (1999) Application of kriging interpolation for glacier mass balance computation. *Geografiska Annaler*, 81, s. 611-619.
- Hoel, A. & Werenskiold, W. (1962) *Glaciers and snowfields in Norway*. Norsk Polarinstitut, Oslo University Press.
- Holmlund, P. & Jansson, P. (2003) *Glaciologi*. Vetenskapsrådet, Stockholm.
- Huss, M. (2013) Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change. *The Cryosphere*, 7, s. 877–887.
- Huss, M., A., B. & Funk, M. (2009) Homogenization of long-term mass-balance time series. *Annals of Glaciology*, 50, s. 198-206.
- IPCC. (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. IPCC Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, .
- Isaksen, K., Hauck, C., Gudevang, E., R.S., Ø. & J.L., S. (2002) Mountain permafrost distribution in Dovrefjell and Jotunheimen, southern Norway, based on BTS and DC resistivity tomography data. *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 56, s. 122-136.
- Jansson, P. (1999) Effect of uncertainties in measured variables on the calculated mass balance of Storglasiären. *Geografiska Annaler*, 81A (4), s. 633-642.
- Kartverket. (2014) *Terrengmodeller land* [Internett], Tilgjengeleg frå: <http://kartverket.no/Kart/Kartdata/Terrengmodeller/Terrengmodell-10-meters-grid/>. [Lest 18.08.2015 2014].
- Kaser, G., Fountain, A. & Jansson, P. (2003) *A manual for monitoring the mass balance of mountain glaciers*. Unesco.
- Kipp & Zonen, B. V. (2013) *Instruction manual CMP/CMA series* [Internett], Tilgjengeleg frå: kippzonen.com. [Lest 23.11.2015 2015].

- Kjøllmoen, B. (red.), Andreassen, L. M., Elvehøy, H., Jackson, M. & Giesen, R., H. (2010) *Glaciological investigations in Norway in 2009*. Norwegian Water Resources and Energy Directorate, Oslo.
- Klok, E. J., Greuell, W. & Oerlemans, J. (2003) Temporal and spatial variation of the surface albedo of Morteratschgletscher, Switzerland, as derived from 12 Landsat images. *Journal of Glaciology*, 49, No,169 s. 491-502.
- Knap, W. H. & Oerlemans, J. (1996) The surface albedo of the Greenland ice sheet: satellite-derived and in situ measurements in the Søndre Strømfjord area during the 1991 melt season. *Journal of Glaciology*, 42(141), s. 364-374.
- Krivoruchko, K. (2012) *Empirical Bayesian Kriging Implemented in ArcGIS Geostatistical Analyst* [Internett], Tilgjengeleg frå: <http://www.esri.com/news/arcuser/1012/empirical-byesian-kriging.html>, Esri. [Lest 01.10.2015].
- Kääb, A., Paul, F., Maisch, M., Hoelzle, M. & Haeberli, W. (2002) The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory: II. First results. *Annals of Glaciology* 34, s. 362-366.
- Langen, M. V. (2011) *Ein enkel orografisk nedbørsmodeell for Vestlandet*. Masteroppgåve i Klimadynamikk, Geofysisk Institutt, Univeritetet i Bergen.
- Liestøl, O. (1962) Special investigation on Hellstugubreen and Tverråbreen. *Norsk Polarinstitutt, Skrifter* 114, s. 175-207.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W. & Chipman, J. W. (2008) *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons, inc., United States of America.
- Linderholm, H., Jansson, P. & Chen, D. (2007) A high resolution reconstruction of Storglaciären mass balance back to 1780/1781 using tree-ring data and circulation indices. *Quaternary Research* 67, s. 12-20.
- Littmann, T. (2008) *Topoclimate and microclimate* i Breckle, S. W., Yair A. & Veste, M. (red.) *Ecological Studies 200. Arid Dune Ecosystems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, s. 175-182.
- Müller, F. & Keeler, C. M. (1969) Errors in short-term ablation measurements on melting ice surfaces. *Journal of Glaciology*, 8, s. 91-105.
- Nesje, A. (2010) *Brelære - bre, landskap, klimaendringer og datering*. Høyskoleforlaget AS, Kristiansand.

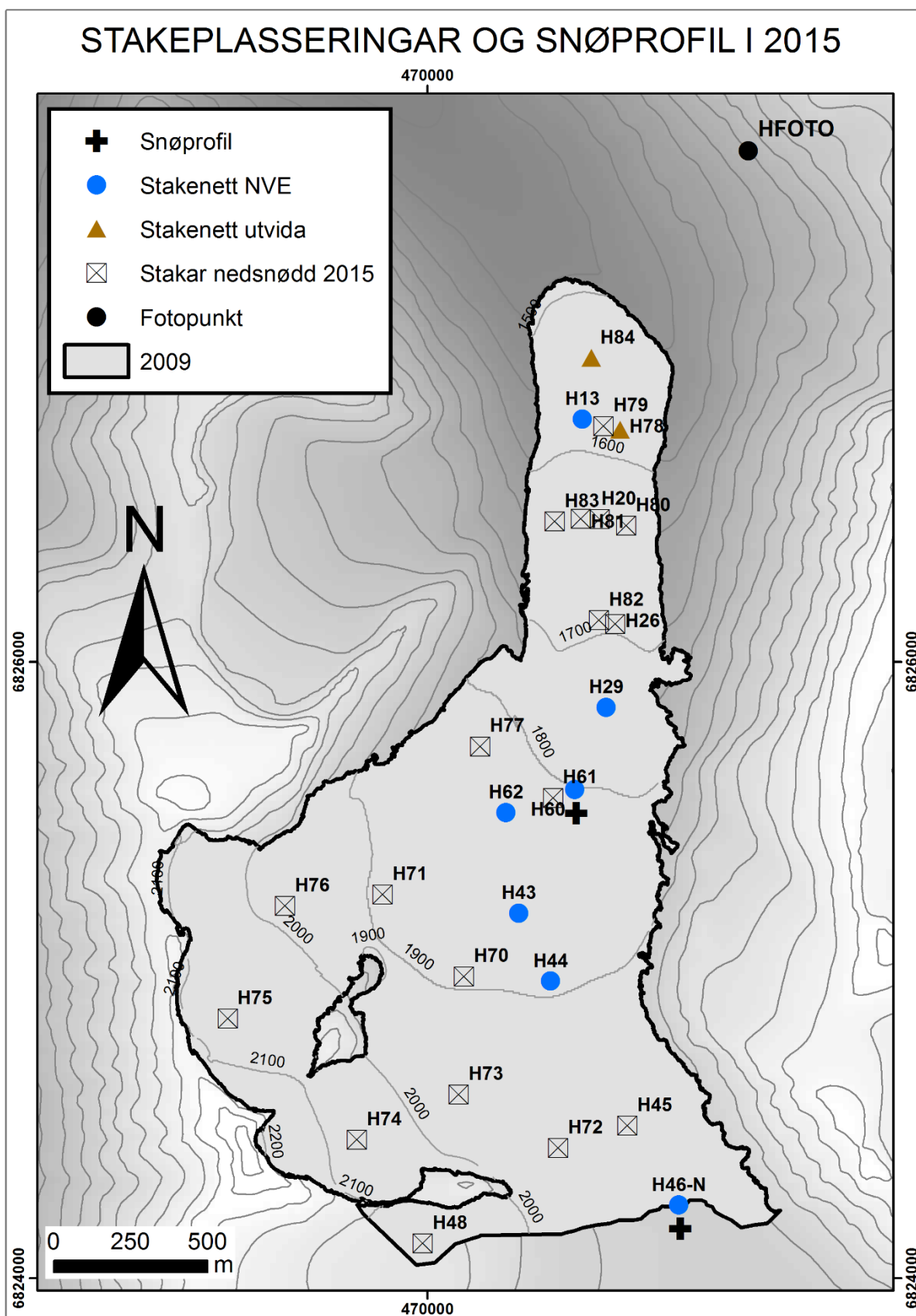
- Nesje, A., Dahl, S. O. & Lie, Ø. (2004) Holocene millennial-scale summer temperature variability inferred from sediment parameters in a non-glacial mountain lake: Danntjørn, Jotunheimen, central southern Norway. *Quaternary Science Reviews*, 23, s. 2183–2205.
- NVE. (2015) *Klimaprodukter bre, Hellstugubreen* [Internett], Tilgjengeleg frå: www.glacier.nve.no, Norges vassdrags- og energi direktorat (NVE). [Lest 03.09.2015 2015].
- Oerlemans, J. (1995) *The Morteratschgletscher project - studying the microclimate of a valley glacier* [Internett], Tilgjengeleg frå: http://www.staff.science.uu.nl/~oerle102/site_Mort/menu_4.html, Institute for Marine and Atmospheric Research. [Lest 10.11.2015].
- Pytte, R. (1964) *Hellstugubreen: en glasiologisk undersøkelse*. Hovedoppgåve i geografi, Universitetet i Oslo.
- Rabatel, A., Dedieu, J. P. & Vincent, C. (2005) Using remote-sensing data to determine equilibrium-line altitude and mass-balance time series: validation on three French glaciers, 1994–2002. *Journal of Glaciology*, 51, No 175, s. 539-546.
- Rasmussen, L. A. & Andreassen, L. M. (2005) Seasonal mass-balance gradients in Norway. *Journal of Glaciology*, 51, s. 601-606.
- Tachon, M. (2015) *Thermal regimes and horizontal surface velocities on Hellstugubreen and Storbreen, Jotunheimen, Southern Norway*. Master Thesis in Geosciences, Department of Geosciences, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Oslo.
- Thibert, E., Blanc, R., Vincent, C. & Eckert, N. (2008) Instruments and Methods, Glaciological and volumetric mass-balance measurements: error analysis over 51 years for Glacier de Sarennes, French Alps. *Journal of Glaciology*, 54, No. 186, s. 522-532.
- USGS. (2013) *USGS science for changing world 'Frequently Asked Questions about the Landsat Missions'* [Internett], Tilgjengeleg frå: http://landsat.usgs.gov/ldcm_vs_previous.php. [Lest 18.09.2015 2013].
- USGS. (2015) *USGS science for a changing world 'Landsat 8'* [Internett], Tilgjengeligg frå: <http://landsat.usgs.gov/landsat8.php>. [Lest 18.09.2015 2015].
- Wackernagel, H. (2003) *Multivariate geostatistics: An Introduction with Applications*. Springer, Berlin.

- Walmsley, A. (2015) *Long-term observations of snow spatial distributions at Hellstugubreen and Gråsubreen, Norway. An investigation in winter balance, time stability, probing reliability, and reduced survey designs*. Master Thesis, Department of Geosciences, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Oslo.
- WGMS. (2013) *Glacier mass balance bulletin No. 12 (2010-2011)*. Zemp, M., Nussbaumer, S. U., Naegeli, K., Gärtner-Roer, I., Paul, F., Hoelzle, M. & Haeberli, W. (red), ICSU(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich Switzerland
- Zemp, M., Thibert, E., Huss, M., Stumm, D., Rolstad Denby, C., Nuth, C., Nussbaumer, S., Moholdt, G., Mercer, A., Mayer, C., Joerg, P. C., Jansson, P., Hynek, B., Fischer, A., Escher-Vetter, H., Elvehøy, H. & Andreassen, L. M. (2013) Reanalysing glacier mass balance measurement series. *The Cryosphere*, 7, s. 1227-1245.
- Østrem, G. & Brugman, M. (1991) *Glacier mass-balance measurements. A manual for field and office work*. National Hydrology Research Institute, Canada.
- Østrem, G. & Haakensen, N. (1999) Map comparison or traditional mass-balance measurements: Which method is better? *Geografiska Annaler*, 81 A (4), s. 703-711.

Vedlegg



Vedlegg 1: Oversiktskart over Hellstugubreen med plassering av snøprofil, fotopunkt, NVE-stakenett, utvida stakenett og nedsnødde stakar i 2014.



Vedlegg 2: Oversiktskart over Hellstugubreen med plassering av snøprofil, fotopunkt, NVE-stakenett, utvida stakenett og nedsnødde stakar i 2015.